



universität
wien

DIPLOMARBEIT

Titel der Diplomarbeit

„Räumliche und zeitliche Variabilität von Murereignissen“

Verfasser

Rainer Stummer

angestrebter akademischer Grad

Magister der Naturwissenschaften (Mag. rer. nat.)

Wien, Dezember 2009

Studienkennzahl lt. Studienblatt:

A 453

Studienrichtung lt. Studienblatt:

Theoretische und Angewandte Geographie

Betreuerin / Betreuer:

Univ.-Prof. Dipl.-Geogr. Dr. Thomas Glade

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit an Eides Statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.
Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.

Wien, im Dezember 2009

Unterschrift

Danksagung

Im folgenden möchte ich mich bei all jenen bedanken, die mich bei der Erstellung dieser Arbeit und im Verlauf meines Studiums unterstützt haben.

Als erstes möchte ich mich bei Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Geogr. Dr. Thomas Glade sehr herzlich bedanken. Als Betreuer meiner Diplomarbeit hat er mir bei der Themenfindung und der Erstellung des Konzeptes sehr geholfen und gab mir bei der Ausarbeitung wichtige Anregungen.

Auch bei Dipl.-Geoökol. Melanie Kappes möchte ich mich sehr herzlich bedanken. Sie gab mir wichtige Hinweise für die Bearbeitung des Themas und stand jederzeit für Fragen und bei Problemen zur Verfügung.

Weiters möchte ich mich bei Melanie, Catrin, Rosmarie und Benni für das Korrekturlesen der Arbeit und zahlreiche Tipps ganz herzlich bedanken.

Meinen Eltern, auf deren Unterstützung ich in allen Lebenslagen zählen kann, gilt mein besonderer Dank.

Aber auch alle Freunde und Studienkollegen seien an dieser Stelle nicht vergessen. Zum einen für die Unterstützung während des Studiums, aber vor allem die Zeit abseits der Universität bleibt unvergessen.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	1
Abstract.....	3
1 Einleitung und Fragestellung.....	5
2 Muren.....	8
2.1. Klassifikation gravitativer Massenbewegungen.....	8
2.2. Muren - Begriffsdefinition	10
2.3. Physikalische Grundlagen.....	12
2.4. Morphologische Gliederung.....	14
2.5. Dispositionskonzept	14
2.5.1. Variable Disposition.....	16
2.5.2. Auslösung.....	18
2.6. Aktivität und Ursachen.....	18
3 Datengrundlage	21
3.1. Orthofotos und Luftbilder	21
3.2. Digitales Geländemodell (DGM).....	24
3.3. Geologie	24
3.4. Landnutzung.....	25
3.5. Niederschlag.....	26
4 Methodische Konzeption	27
4.1. Kartierung.....	27
4.2. Verknüpfung und Berechnung von zusätzlichen Informationen.....	30
4.2.1. Höhendaten und Neigungen	31
4.2.2. Hydrologisches Einzugsgebiet der Murereignisse	31
4.2.3. Einzugsgebiete und Geologie.....	32
4.2.4. Export und räumliche Einschränkung	33
4.3. Statistische Tests	33
4.3.1. Test auf Normalverteilung	33
4.3.2. Nichtparametrische Tests	34
4.3.3. Korrelationsanalyse.....	34
4.4. Räumliche Verteilung, Eigenschaften und Unterschiede.....	35
4.5. Zeitliche Variabilität	37
4.6. Einfluss auf die Variabilität.....	38

4.6.1.	Landnutzung	38
4.6.2.	Niederschlag	39
5	Untersuchungsgebiet	41
5.1.	Überblick und geographische Lage	41
5.2.	Klimatische Bedingungen	44
5.3.	Geologie und Geomorphologie	45
5.4.	Historische Entwicklung	48
6	Kartierungsergebnisse	50
6.1.	Anzahl und räumliche Lage	50
6.2.	Geometrische Eigenschaften	54
6.3.	Verteilung und Unterschiede im Untersuchungsgebiet	58
7	Zeitliche Variabilität	62
7.1.	Landnutzung	68
7.2.	Niederschlag	74
8	Diskussion	79
8.1.	Datenqualität	79
8.2.	Kartierungsergebnisse	80
8.3.	Murparameter	82
8.4.	Zeitliche Variabilität	83
8.5.	Landnutzung	85
8.6.	Niederschlag	86
9	Ausblick	89
10	Literaturverzeichnis	91
11	Abbildungsverzeichnis	97
12	Tabellenverzeichnis	98
	Anhang	99

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde die Variabilität von Murereignissen in der Barcelonnette Region in den französischen Alpen untersucht. Die festgestellte Variabilität wurde in einem weiteren Schritt mit der Landnutzung und Niederschlagsdaten in Bezug gesetzt um mögliche Zusammenhänge und Einflüsse zu ermitteln.

Um diese Analysen durchführen zu können wurden anhand von sechs Orthofotos Murereignisse kartiert. Diese lagen zwischen 1956 und 2004, wobei zwei im Zuge dieser Arbeit orthorektifiziert werden mussten. Durch die Aufnahmezeitpunkte ergaben sich fünf Zeitscheiben mit einer Dauer von 4 bis 18 Jahren. Durch den Vergleich zweier aufeinander folgender Orthofotos konnten neue, in der entsprechenden Periode aufgetretene Murereignisse identifiziert und kartiert werden. Durch dieses Vorgehen wurde ein Datensatz mit 188 Murereignissen kreiert. Diese finden sich im Wesentlichen in den Bereichen der Schuttfächer und Felsrinnen unterhalb der Felswände. In den Gerinnen und in tiefer liegenden Bereichen der Einzugsgebiete konnten keine Muren identifiziert werden.

Die Ereignisse wurden in weiterer Folge ausgewertet und getrennt nach der Talseite und der Geologie analysiert. Dabei zeigte sich, dass an der nordexponierten Talseite deutlich weniger Ereignisse auftraten als auf der südexponierten Seite. Im Flysch der nordexponierten Talseite trat aber eine vergleichbare Anzahl an Ereignissen auf wie im Kalk. Die Unterschiede der beiden Talseiten, die sich auch in den Eigenschaften der Murereignisse finden, sind im Wesentlichen auf die unterschiedlichen morphologischen Verhältnisse der beiden Talseiten zurückzuführen.

Die Auswertung der einzelnen Zeitscheiben ergab, dass die Aktivität im Untersuchungsgebiet stark schwankte. So fiel sie nach 1974 bis 1995 ab, lag 2000 wieder deutlich höher und erreichte 2004 einen auffallend hohen Wert. Wobei hier die unterschiedliche Dauer der Zeitscheiben und der Qualitätsunterschiede der Orthofotos berücksichtigt werden muss. In den unterschiedlichen Zeitscheiben kam es neben der Anzahl bzw. Rate auch zu großen Unterschieden in den Mureigenschaften.

Die beiden Untergliederungen (Talseite und Geologie) verhielten sich in den einzelnen Zeitscheiben weitestgehend gleichmäßig. Zwar gibt es zum Teil deutliche Schwankungen, aber gewisse Grundzüge blieben im Wesentlichen konstant. Bis auf die Zeitscheibe 1982, die ein deutlich anderes Bild zeigte als die restlichen vier. Nichtsdestotrotz und aufgrund der teilweise geringen Fallzahl und mangelnder statistischer Signifikanz der Klassendifferenzen konnte ein unterschiedliches Verhalten der einzelnen Teilräume nicht bestätigt werden.

Die Berücksichtigung der Landnutzungsdaten konnte keinen Beitrag zur Erklärung der Variabilität liefern. Die Veränderungen der Landnutzung zwischen 1974, 1982 und 2000 fanden im Wesentlichen in tiefer liegenden Bereichen statt. Im Bereich der Murereignisse und deren hydrologischem Einzugsgebiet findet sich meist keine Vegetation, sondern lediglich unbedeckte Fels- und Schuttflächen. Entsprechend der mangelnden Veränderung der Murereignisse in ihrer Lage und der Landnutzung im Einzugsgebiet der Muren war kein Zusammenhang festzustellen.

Der Vergleich mit den Niederschlagsdaten führte nur teilweise zur Erklärung der Variabilität. Dazu wurden aufgrund der Datenverfügbarkeit nur tägliche Niederschlagsdaten verwendet. Dazu wurde der maximale Wert und der maximale 2-Tagesniederschlag einer Zeitscheibe mit der Ereigniszahl verglichen. Zwar ergab sich wie z.B. 2004 eine gute Übereinstimmung, aber es konnten nicht alle Zeitscheiben dieses Bild bestätigen. Wobei hier auf die große Niederschlagsvariabilität innerhalb des Gebietes und die Bedeutung von Niederschlägen mit einer Dauer unter einer Stunde hingewiesen werden muss. Beides konnte nicht berücksichtigt werden.

Sämtliche Ergebnisse sind unter dem Gesichtspunkt der zeitlichen Auflösung, der teilweise geringen Fallzahl, der unterschiedlichen Qualität der Orthofotos, der Beschränkung auf Bereiche außerhalb der Gerinne und der begrenzten Repräsentanz der Niederschlagsdaten für die einzelnen Untersuchungsgebietsbereiche zu sehen. Diese Punkte sind von zentraler Bedeutung für die Ergebnisse und ihre Aussagekraft.

Abstract

The variability of debris flows in the Barcelonnette area (French Alps) was determined in this paper. Land use and precipitation were taken into account to explain the recognized variability.

For this purpose, two aerial photographs were rectified. In combination with four other orthophotos a time span from 1956 to 2004 was covered. By comparison of two sequenced photographs debris flows in five different time slices, covering a time span of 4 to 18 years were mapped.

188 debris flows were found in this investigation. They are situated on debris cones and rock couloirs in the high altitude regions of the investigation area. No events were found in the channels and gullies.

Approximately 2/3 of the debris flows were found on the south facing side of the valley. The rest is situated on the north facing side, where a comparable number is situated on limestones and flysch. Differences in the characteristics of the debris flows on the different valley sides are mainly due to varieties in the morphological setting.

The activity of the debris flows showed a decline after 1974 till 1995. After this, it rose in 2000 and reached 2004 a very high level. Important are thereby the differences of the quality of the orthophoto and the different time spans between these. Next to the activity changes also differences in the characteristics of the debris flows could be recognized.

The valley sides and the geological entities show a uniform pattern in the different time slices. Only the one from 1982 shows different values, but this is mainly attributed to the poor quality of the orthophoto. So the individual entities were considered to have a unique behavior and no differences could be confirmed.

The land use data could not contribute for the explanation of the variability. The changes between 1974 and 2000 took place in deeper situated areas. No changes could be observed in the catchments of the flows. Also the situation of the debris flows had not changed.

The precipitation data used in this investigation explained little of the variability. The time slice of 2004 shows a good agreement with the activity, but most of the other ones lack of an analogy. Only daily precipitation data were available. It's important to consider that triggering precipitation may only have a duration under one hour and is not found in the daily data. Another important lack is the spatial variability of precipitation inside the area.

All results had to be seen under the circumstances of temporal resolution, spatial representation, low number of cases and different quality of the orthophotographs.

1 Einleitung und Fragestellung

Naturgefahren sind seit jeher ein Begleiter der Menschheit bei der Besiedlung alpiner Regionen. Im Laufe der Geschichte kam es immer wieder zu katastrophalen Ereignissen die Leid, Zerstörung und Tod über die Bewohner brachten. Es gibt im Alpenraum entsprechend eine Vielzahl an historischen Dokumenten und Katastrophenchroniken die vergangene Ereignisse zusammengetragen haben.

Die angetroffenen Gefahren sind dabei vielfältiger Natur und unterscheiden sich in ihrem zeitlichen und räumlichen Auftreten. Ein großes Problem stellt dabei oftmals die Unregelmäßigkeit (z.B. ZIMMERMANN et al. 1997) und lange Wiederkehrintervalle dar. Diese sorgten immer wieder für Vergessen bzw. Verdrängen der Gefahren und zur Besiedelung gefährdeter Gebiete. Aber auch wirtschaftliche Zwänge (z.B. Nutzung der Wasserkraft) sorgten dafür das sich die Menschen in der Gefahrenzone ansiedelten.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dem Auftreten und der Aktivität von Murereignissen. Diese sind eine bedeutende Gefahr in alpinen Regionen. Entsprechend kam es durch Muren auch immer wieder zu verheerenden Zerstörungen. Auch der Schutz vor diesen Gefahren hat eine lange Tradition. So wurde bereits 1537 die Pont'alto – Sperre bei Trient errichtet oder die Falkensteinsperre in Osttirol vor rund 450 Jahren (LUZIAN 2002, 83).

Durch ihre Bedeutung für den Lebensraum des Menschen werden Muren seit langer Zeit erforscht. Vor allem die Bändigung der Wildbäche und die Geschiebemanagement bzw. Rückhaltung stehen im Mittelpunkt des Interesses. Durch Wiederaufforstungen, Sohlstabilisierungen und Geschiebesperren wurde versucht der Gefahr Herr zu werden. Die Ausweisung von gefährdeten Gebieten spielt ebenfalls eine wichtige Rolle. Durch die moderne EDV erfolgt diese Ausweisung verstärkt durch die Modellierung von potentiellen Ereignissen, deren Eigenschaften sich zumeist auf die Kartierungsergebnisse vergangener Murgänge stützt.

Derzeit beschäftigt sich eine Vielzahl von Studien mit der Verbesserung von statistischen, rheologischen und physikalischen Modellen. Generell spielt die Modellierung für die Gefahren- und Risikoabschätzung eine wichtige Rolle. Dabei sind sowohl regionale Modelle als auch lokale Modelle von Bedeutung. Die erste Gruppe (z.B. HORTON et al. 2008) ermöglicht mit relativ geringem Aufwand einen Überblick in einem größeren Gebiet zu

erhalten. Sie bietet damit wichtige Informationen für die Raumordnung. Auch kann damit die Auswahl von gefährdeten Gebieten erfolgen, in denen eine detaillierte Modellierung von Bedeutung ist. Diese Detailmodellierungen arbeiten zumeist mit Szenarien für einzelne Gerinne, in denen bestimmte Magnituden auf deren Gefahrenpotential hin untersucht werden (z.B. YU et al. 2006; GENTILE et al. 2008; CALLIGARIS et al. 2008).

Neben der reinen Modellierung, aber auch als Grundlage für diese, beschäftigen sich viele Studien mit dem Auftreten von Murereignissen in der Vergangenheit. Dabei werden verschiedenste Methoden (z.B. Luftbilddauswertungen, Feldkartierungen, Auswertung historischer Dokumente) angewendet um die Anzahl, Frequenz, Magnitude und räumliche Verbreitung vergangener Ereignisse zu erheben.

So gab es etwa 1991-1993 das EU-Programm EPOCH (EPOCH 1993), in dessen Rahmen Untersuchungen zum zeitlichen Auftreten und der Vorhersage von gravitativen Massenbewegungen stattfanden. Darauf folgte 1994-1996 das TESLEC-Programm (DIKAU und SCHROTT 1999), in dem es um die zeitliche Stabilität bzw. Aktivität der Massenbewegungen unter Berücksichtigung des Klimawandels ging. Neben diesen Programmen gibt es zahlreiche Einzeluntersuchungen die menschliche Eingriffe und klimatische Veränderungen in Bezug zur Aktivität gravitativer Massenbewegungen bzw. Muren im speziellen setzen. Die zeitliche Dimension schwankt dabei sehr stark von Jahrtausenden bis Jahrzehnten.

In diesem Bereich, also der Untersuchung des zeitlichen Auftretens und der Beeinflussung durch veränderliche Umweltbedingungen und menschliche Eingriffe ist die vorliegende Arbeit angesiedelt.

Dabei wird die Muraktivität in Barcelonnette in Südfrankreich (französischen Alpen) erhoben und in Bezug zur Landnutzung und der Niederschlagsintensität gebracht.

Die zentrale Forschungshypothese lautet entsprechend:

Die Muraktivität ist zeitlich variabel und von der Landnutzung im Untersuchungsgebiet abhängig.

Gemäß dieser grundsätzlichen Hypothese wurden mehrere Fragestellungen erarbeitet, welche die generelle Hypothese beantworten werden. Diese lauten wie folgt:

1. Variiert das Auftreten von Murereignissen im Laufe der Zeit ?

Damit soll geklärt werden, ob es zu Schwankungen der Aktivität im betroffenen Gebiet kam. Diese Fragestellung ist von zentraler Bedeutung für die weiteren Fragen.

2. Unterscheiden sich die Variationen in den unterschiedlichen Teilgebieten ?

Zur Diskussion steht, ob sich das gesamte Untersuchungsgebiet homogen verhält oder ob Unterschiede aufgrund verschiedener Umweltbedingungen auftreten.

3. Können die Variationen durch die Landnutzungsänderungen erklärt werden ?

Mit dieser Fragestellung soll dem Ursprung der Variationen auf den Grund gegangen werden und diese in Bezug zu Veränderungen in der Landnutzung gesetzt werden.

4. Sind die Variationen auf Veränderungen des Niederschlages zurückzuführen ?

Auch hier wird die Ursache der Variationen beleuchtet. Da der Niederschlag im Regelfall als entscheidendes Kriterium für die Auslösung bewertet wird, soll er zusätzlich in Betracht gezogen werden um die Ergebnisse von Punkt 3 zu überprüfen.

Anhand dieser vier aufgeführten Fragen werden in weiterer Folge die Daten der Muraktivität erhoben, aufbereitet und analysiert. Danach erfolgt die Auswertung und Interpretation, in deren Rahmen die Fragestellungen überprüft und die zentrale Forschungsfrage behandelt wird.

Die Murereignisse werden anhand von sechs Orthofotos kartiert. Dadurch wird ein Datensatz mit Muren, getrennt in fünf Zeitscheiben kreiert, der in weiterer Folge für die Analyse der räumlichen Verteilung und zeitlichen Variabilität genutzt wird. Durch die Verknüpfung mit geologischen Daten lässt sich neben der Gliederung in die beiden Talseiten eine zusätzliche Klassifikation durchführen. Die ermittelte Variabilität wird mit Landnutzungsdaten von drei Zeitpunkten und Niederschlagsdaten des gesamten Untersuchungszeitraumes überlagert und analysiert.

2 Muren

Im folgenden Kapitel sollen allgemeine Grundlagen zu dem Phänomen „Mure“, sowie den Begrifflichkeiten und Abgrenzungen zu anderen Phänomenen erläutert werden. Insbesondere wird hierbei auf die Auslösung und Beeinflussung im Sinne eines Dispositionskonzeptes eingegangen, da dieses für die vorliegende Arbeit von Bedeutung ist.

Der Begriff Mure ist im deutschsprachigen Alpenraum schon sehr lange gebräuchlich. Bei STINY (1910, 4) wird die Herkunft des Wortes Mure von „brüchig, morsch, mürbe“ abgeleitet. Zu dieser Zeit (frühes 20. Jahrhundert) wurde das Wort in der Literatur noch unterschiedlich geschrieben und auch für unterschiedliche Prozesse angewendet. Ebenso treten noch eine Vielzahl lokaler Bezeichnungen für das Phänomen auf (vgl. STINY 1910, 4-6).

Bis heute werden als Bezeichnung für das Ereignis synonym für das Wort Mure die Bezeichnungen Murgang oder Murschub verwendet (z.B. in AULITZKY 1973; COROMINAS et al. 1996 und LUZIAN 2002).

In der englischsprachigen Literatur wird für Muren die Bezeichnung „debris flow“ verwendet. Allerdings deckt sich die Bezeichnung nicht vollständig mit der deutschsprachigen und ist je nach Kriterium etwas weiter oder enger gefasst. Um auf diesen Umstand aber näher eingehen zu können muss zuerst der Begriff Mure definiert und in eine generelle Klassifikation von Prozessen eingegliedert werden.

2.1. Klassifikation gravitativer Massenbewegungen

Der Prozess Mure ist den sogenannten „gravitativen Massenbewegungen“ bzw. „mass movements“ im englischen Sprachraum zugeordnet. Allerdings wird statt diesem oft der Begriff „landslides“ verwendet. Auch im deutschen Sprachgebrauch wird häufig statt gravitativer Massenbewegung der Begriff Hangrutschungen verwendet (GLADE und DIKAU 2001). Unter diesen Begriffen werden nach GLADE und DIKAU (2001, 42) *hangabwärts gerichtete Bewegungen von Fels- und/oder Lockergesteinen unter der Wirkung von Schwerkraft verstanden*. Es handelt sich dabei um ein Gruppe verschiedenster Prozesse mit unterschiedlichen Bewegungsmechanismen.

Die gängigste Klassifikation der gravitativen Massenbewegungen ist jene nach VARNES (1978), zitiert unter anderem in DIKAU et al. (1996); SIDLE und OCHIAI (2006);

PICARELLI et al. (2005) und CORNFORTH (2005). In weiterer Folge wurde diese von CRUDEN und VARNES (1996) verfeinert und fand in dieser Form Einzug in die zuvor erwähnten Werke jüngerer Datums.

Tabelle 1: Klassifikation gravitativer Massenbewegungen (CRUDEN und VARNES 1996, 38)

TYPE OF MOVEMENT	TYPE OF MATERIAL		
	BEDROCK	ENGINEERING SOILS	
		PREDOMINANTLY COARSE	PREDOMINANTLY FINE
Fall	Rock fall	Debris fall	Earth fall
Topple	Rock topple	Debris topple	Earth topple
Slide	Rock slide	Debris slide	Earth slide
Spread	Rock spread	Debris spread	Earth spread
Flow	Rock flow	Debris flow	Earth flow

Bei der Klassifikation werden, wie in Tabelle 1 ersichtlich, die einzelnen Prozesse aufgrund ihres Bewegungstyps und des unterschiedlichen Materials eingeteilt. Muren befinden sich in der Kategorie „flow“, sind also eine fließende Bewegung. Die Spalte „predominantly coarse“ gibt dabei den Hinweis, dass es sich überwiegend um Lockersediment mit einer Korngröße über 2 mm handelt. Bei einer Dominanz der Korngröße unter 2 mm (Sand, Schluff, Ton) spricht man von einem „Earth flow“. Da diese Klassifikation noch sehr breit gefächert ist werden bei der Bezeichnung noch einige Parameter verwendet, die eine genauere Abstufung ermöglichen. Diese sind zum Beispiel abhängig vom Aktivitätszustand, der Geschwindigkeit, dem Wassergehalt oder dem Verhalten (CRUDEN und VARNES 1996, 38).

Sehr ähnlich dieser Klassifikation ist jene des EPOCH (1993) Projektes der EU, welche in der ersten Stufe ebenfalls auf der Bewegungsart und dem Material beruht (siehe DIKAU et al. 1996, 3). Der Unterschied besteht in der Untergliederung der Rutschungen in die Kategorien rotaional, translational und planare Bewegungen. Für den Prozess der Muren ergeben sich keine wesentlichen Unterschiede in den verschiedenen Klassifikationen.

Diese primär recht simpel aufgebauten Klassifikationen werden in weiterer Folge durch weitere Untergliederungen wie die Aufnahme des initialen Fehlers und dessen Voranlage und anderer geotechnischer Parameter und Bewegungskriterien deutlich komplexer.

Eine andere Klassifikation, die nicht auf geotechnische Kriterien wie die Art des Versagens oder den Mechanismus der Bewegung abzielt wird von SIDLE und OCHIAI (2006, 24ff) beschrieben. Die Terminologie wird weitestgehend von VARNES (1978) übernommen, die

Einteilung erfolgt aber im Wesentlichen durch die Geschwindigkeit und die Tiefgründigkeit der Bewegung. Die Kategorien in dieser Arbeit sind:

- Shallow, rapid landslides
- Rapid, deep slides and flows
- Slower, deep-seated landslides
- Slow flows and deformations
- Surficial mass wasting

Muren fallen dabei vor allem in die erste Kategorie, sind aber auch in der zweiten anzutreffen. Der Vorteil liegt darin, dass die interne Bewegungsdynamik nicht von Bedeutung ist. Die Abgrenzung über die Bewegungsgeschwindigkeit ist für Fragestellungen, bei denen eine genaue Prozesskenntnis und Beschreibung nicht von Bedeutung ist, wie zum Beispiel in raumplanerischen Bereichen ausreichend.

Die vorliegende Arbeit stützt sich aber auf die Klassifikation von CRUDEN und VARNES (1996) und verwendet dessen Terminologie.

2.2. Muren - Begriffsdefinition

Muren sind ein gängiges Phänomen, das in nahezu allen alpinen bzw. hügeligen Gebieten der Erde auftreten kann. Es ist lediglich an die Verfügbarkeit von Material, Wasser und ein entsprechendes Gefälle gebunden (RICKENMANN und ZIMMERMANN 1993). Die Beschreibung von Muren wird im Wesentlichen seit langem und von den meisten Autoren sehr ähnlich vorgenommen. Allerdings unterscheiden sich im Detail bzw. in der Betonung einzelner Bestandteile die Definitionen.

STINY (1910, 2) gibt zwar keine Definition, beschreibt aber die Prozessentwicklung vom Hochwasser zur Mure in einem Gerinne mit folgenden Worten: *Je mehr jedoch die Menge des mitgeführten Geschiebes im Gerinne anschwillt, desto größer wird die innere Reibung eines solchen Gemisches von Wasser und Material, bis sich schließlich von einer gewissen Grenze ab nicht mehr eine Hochflut, sondern eine zähflüssige Masse, aus Wasser, Erde, Sand, Schotter, Blöcken und Holz in buntem Durcheinander bestehend, einem Lavastrom gleich zu Tale wälzt; die geänderte Bewegungsart entspricht annähernd derjenigen zähflüssiger Massen, an die Stelle eines geschiebereichen Hochwassers tritt eine echte Mure.*

Diese Beschreibung beinhaltet bereits die beiden wichtigen Punkte, die für die Klassifikation von Muren von Bedeutung sind. Zum einen ist es der hohe Anteil von Feststoffen im Vergleich zu Hochwasserereignissen und zum anderen das veränderte Fließverhalten.

60 Jahre später definiert AULITZKY (1973, 50) Muren als kennzeichnendes Phänomen des geschiebeführenden Wildbaches. Darunter werden *in den österreichischen Alpenländern aus Geröll, Geschiebe, Erdreich und Schlamm bestehenden, von Felsblöcken Bäumen udgl. durchsetzten, wassergetränkten „Material-Ströme“ verstanden, die mit meist hoher Geschwindigkeit durch Wildbachgräben zu Tale tosen, um sich dort abzulagern.*

In dieser Definition sieht man die enge Beziehung der Muren mit der Wildbachkunde in Österreich. Diese gehen in der österreichischen Administration Hand in Hand. Die Muren, die für den menschlichen Siedlungsraum von Bedeutung sind finden zumeist in den Gerinnen statt und es Bedarf daher einer gemeinsamen Betrachtung von Hochwassern mit oder ohne starker Geschiebeführung und „echten“ Muren. Entsprechend stehen die Wildbäche in und oberhalb von Siedlungen im Zentrum, während Hangmuren und kleinere Ereignisse in zumeist entlegenen Gebieten stattfinden und daher in der Betrachtung des Autors von geringerer Bedeutung sind.

Bei TAKAHASHI (2007, 6) findet sich eine recht pointierte Definition, welche die physikalischen Eigenschaften in den Vordergrund stellt: *Debris flow is a flow of sediment and water mixture in a manner as if it was a flow of continuous fluid driven by gravity, and it attains larger mobility from the enlarged void space saturated with water or slurry.*

Bei WICHMANN (2006, 97) wird noch auf den hohen Feststoffgehalt und dessen gleichmäßige Verteilung in der Mure sowie die hohe Transportgeschwindigkeit hingewiesen. COSTA (1984, 268) hingegen betont vor allem, dass es sich um einen Prozess zwischen Rutschung und Hochwasser handelt, dessen mechanische Eigenschaften sich von beiden unterscheidet.

Zusammenfassend lassen sich folgende wichtige Punkte herausstreichen, die für Muren charakteristisch sind:

- Fließen als Bewegungsart
- Fließverhalten des Gemisches (nicht newtonisch)
- Hohe Prozessgeschwindigkeit
- Hohe Feststoffkonzentration

Es gibt verschiedene Möglichkeiten der internen Klassifikation von Muren. Zu finden sind zum Beispiel bei TAKAHASHI (2007, 8ff und 30-31) Einteilungen nach dem Material (stony – muddy – viscous), den auslösenden Faktoren (z.B. Niederschlag, Schneeschmelze, Erdbeben) oder dem Materialursprung (z.B. Jung- oder Altschutt, Vulkanasche).

Für die vorliegende Untersuchung im Alpenraum ist die Untergliederung von ZIMMERMANN et al. (1997) hervorzuheben, die für diese Verhältnisse aufgestellt wurde. Sie basiert auf der Unterscheidung der Anrisszonen und folglich der Muren in sogenannte Hang- und Talmuren. Erstere haben ihr Anrissgebiet, wie der Name bereits sagt in Hangbereichen mit Lockermaterial bzw. am Übergang zwischen Felswänden und Schutthalden. Die Talmuren starten in Gerinnen bzw. Felsrinnen durch Anbruch der Gerinnesohle oder der Gerinneflanken.

2.3. Physikalische Grundlagen

Muren treten auf, wenn zumeist schlecht sortiertes, unkonsolidiertes Material auf Hängen oder in Rinnen durch die Zugabe von Wasser in Bewegung gesetzt wird. Dabei ist ein großes Gefälle und das Fehlen von Vegetation von Vorteil (vgl. COSTA 1984, 269).

Sie bestehen wie schon die Definitionen besagen aus einem Gemisch aus Wasser, Luft und Feststoffen. Der Gehalt an Feststoffen liegt nach COSTA (1984, 274) bei rund 35-90% Gewichtsanteil. Er führt aber auch eine zusätzliche Kategorie zwischen Hochwasser und Muren ein, sogenannte hyperconcentrated flows und legt dabei die Grenze der Feststoffkonzentration auf 70% (COSTA 1984, 288). Nach COROMINAS et al. (1996, 172) wird dieser Bereich von einigen Autoren aber eher als flüssige Variation von Muren angesehen und man muss wohl auch von einem kontinuierlich Übergang zwischen Abfluss und Muren ausgehen. Nichtsdestotrotz ist dieser Bereich aufgrund der sehr hohen Feststofffracht häufig gesondert ausgewiesen und wird in der Literatur häufig verwendet (z.B. bei LORENZINI und MAZZA 2004, MEETEI et al. 2007, WRACHIEN und MAMBRETTI 2008).

Sehr wichtig, vor allem für das Fließverhalten und damit die Modellierung, ist die Tatsache, dass sich Muren visco-plastisch Verhalten, also eine deutlich höhere Viskosität als Wasser besitzen und nicht den newtonschen Gesetzen für Flüssigkeiten gehorchen (vgl. COSTA 1984, 273).

Die Fließgeschwindigkeit kann sehr hoch sein, Angaben schwanken aber je nach Autor sehr stark. So spricht LUZIAN (2002, 16) von Geschwindigkeiten über 100km/h (~28 m/s), COSTA (1984, 273) hingegen in Abhängigkeit von Größe, Feststoffkonzentration und Sortierung sowie der Gerinnegeometrie von 0,5–20 m/s. Nach RICKENMANN und ZIMMERMANN (1993) liegen die beobachteten Geschwindigkeiten in der Schweiz bei 13–14m/s.

Entsprechend ihrer physikalischen Eigenschaften treten Muren oft in mehreren, kurz aufeinander folgenden Wellen auf (Murschübe). Die steile Stirn (siehe Abbildung 1) weißt dabei die größte Höhe auf und transportiert die größten Blöcke. Nachfolgende Bereiche der Mure sind eher flüssig, mit weniger Blöcken durchsetzt aber weiterhin mit einem sehr hohen Feststoffgehalt (vgl. COSTA 1984, 273).

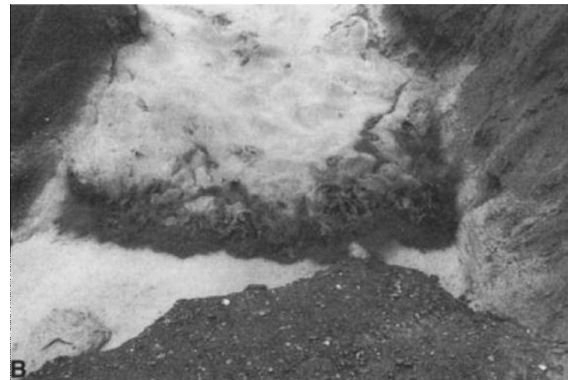


Abbildung 1: Fronte eines Murschubes, Jiang Jia Ravine, Yunnan, China, 24.6.1990 (Foto von K.M. Scott in IVERSON 1997, 256)

Für die Entstehung von Muren, also das geotechnische Versagen des Substrates beschreibt TAKAHASHI (2007, 103-167) drei verschiedene Szenarien:

1. durch Sohlerosion
2. durch Rutschungen
3. durch das Brechen von natürlichen Dämmen

Der erste Fall tritt in Rinnen, Gullys oder im Gerinnebett von Wildbächen auf, sofern diese über eine aus Lockersediment bestehende Sohle verfügen. Hierbei ist entscheidend, ob die Scherspannung des fließenden Wassers groß genug ist um zumindest einen Teil der Sohlschicht zu mobilisieren. Dabei steigt die Belastung der Sohle mit zunehmender Fließgeschwindigkeit (also Gefälle und Wassertiefe). Sollte die theoretische Tiefe, bis zu der die Scherspannung die widerstehenden Kräfte (Reibung, Kohäsion) übersteigt geringer als der Korndurchmesser des Sohlmaterials sein, werden nur einzelne Bestandteile als Geschiebefracht mobilisiert. Im anderen Fall kommt es zur plötzlichen Mobilisierung großer Materialmengen und dem entstehen einer Mure.

Im zweiten Fall wird eine initiale Rutschung während der Bewegung verflüssigt. Im Regelfall geschieht dieser Vorgang ohne weitere Zugabe von Wasser, da Rutschungen ohnehin meist

wassergesättigt sind. Es kann aber auch wie bei der Unterspülung und dem folgenden Abrutschen von Seitenböschungen erst im Gerinne zur Verflüssigung kommen. Bei größeren Rutschungen kann sich auch nur ein Teil der Rutschmasse in eine Mure umwandeln, während der überwiegende Teil der Masse als großer Block ins Tal rutscht.

Die dritte Möglichkeit tritt beim Bruch von natürlichen Dämmen auf. Die Dämme wurden zumeist durch Rutschungen oder ähnliche Prozesse gebildet und stauen ein Gerinne auf. Es kommt zumeist sehr schnell zum Überströmen und dem Einschneiden in das unkonsolidierte Material auf der Rückseite des Damms. Dabei kommt es wie im ersten Fall beschrieben zur Mobilisierung der Gerinnesohle und der Bildung einer Mure. Von zusätzlicher Bedeutung ist dabei die Menge an gespeichertem Wasser, dass in kurzer Zeit abfließen kann.

2.4. Morphologische Gliederung

Murereignisse werden in der Regel in drei Einheiten gegliedert: das Quellgebiet, der Murkanal und das Ablagerungsgebiet (COROMINAS et al. 1996, 161). Das Quellgebiet stellt den Anriss bzw. die initiale Rutschung der Mure dar. Bei Anrissen in Rinnen, Gullys oder Gerinnen ist diese aber oft nicht zu erkennen.

Der Murkanal bzw. die Transitzone ist durch die linienhafte Struktur und ein relativ ausgeglichenes Massenbudget gekennzeichnet. Durch die große Erosionsleistung kann es zu einer starken Eintiefung an der Sohle kommen. Es werden auch häufig Levees durch die laterale Entwässerung entlang des Kanals abgelagert.

Bei flacher werdendem Terrain kommt es zum Stillstand der Mure. Dies kann im Gerinne selbst oder aber beim Austritt auf einen Murkegel erfolgen. Dabei bleibt die gesamte Masse als Zunge stehen und lediglich ein Teil des Wassers mit Feinmaterial fließt aus. Im Gegensatz zu fluvialen Ablagerungen kommt es zu keiner Sortierung des Materials, da die Masse als Einheit liegen bleibt. Entsprechend lassen sich Murablagerungen sehr gut von fluvialen Ablagerungen unterscheiden (vgl. WICHMANN 2006, 105-107).

2.5. Dispositionskonzept

Um nun der Frage nachzugehen wann und wodurch es zu einem Murereignis kommt wird das Dispositionskonzept, wie es bei ZIMMERMANN et al. (1997, 31ff) beschrieben ist kurz erläutert.

Die Disposition bezeichnet dabei die Bereitschaft oder Anfälligkeit eines Gebietes gegenüber einem speziellen Prozess. Dabei wird zwischen Grunddisposition und variabler Disposition

unterschieden. Zusätzlich gibt es noch einen Auslöser, also eine, im Regelfall, externe Belastung.

Unter der Grunddisposition werden in diesem Konzept die Parameter verstanden, die über den Zeitraum der Untersuchung als konstant angesehen werden können. Im Bezug auf die Muren der vorliegenden Arbeit können also die Parameter Geologie und folglich Materialzusammensetzung und sämtliche Parameter der Topographie (Hangneigung, Höhenlage udgl.) als Grunddisposition gesehen werden.

Die variable Disposition unterliegt für den Zeitraum der Untersuchung Schwankungen und ist damit für die unterschiedliche Belastbarkeit des Systems durch eine externe Größe verantwortlich. Hervorzuheben ist hier vor allem die Verfügbarkeit von Material im Einzugsgebiet, die hydrologische Vorgeschichte des Gebietes sowie veränderte Abflussbedingungen durch Landnutzungsänderungen.

Der Auslöser selbst ist ein einzelnes, episodisches Ereignis. Dabei kommen im Fall von Muren zwar prinzipiell auch Erdbeben und Schneeschmelze in Frage, die vorliegende Untersuchung wird sich aber auf Niederschlagsereignisse als Auslöser konzentrieren.

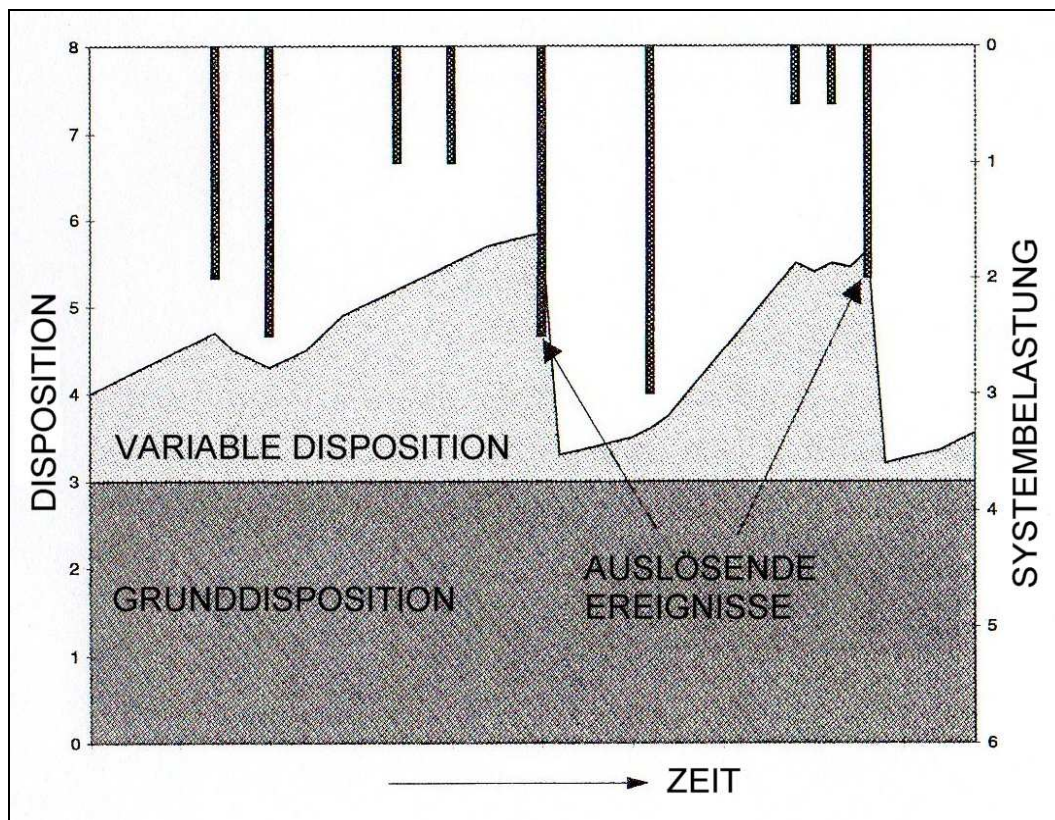


Abbildung 2: Dispositionsmodell (ZIMMERMANN et al. 1997, 32, verändert)

In Abbildung 2 ist das Konzept graphisch dargestellt. Man sieht wie durch die Addition von Grund- und variabler Disposition (flächig dargestellt) die Anfälligkeit des Systems gegenüber einer externen Belastung (Balken) schwankt. Die beiden Achsen sind gespiegelt aufgetragen, da mit abnehmender Disposition die Belastung größer werden muss. Aufgrund dieser Tatsache stellt es sich teilweise sehr schwierig dar, auslösende Faktoren eindeutig festzulegen. Die Intensität mit der eine Systembelastung (Niederschlag) zum Auslöser eines Ereignisses (Mure) wird ist nicht konstant sondern schwankt im Laufe der Zeit, abhängig von der Schwankung der variablen Disposition.

2.5.1. Variable Disposition

Wie bereits erwähnt sind drei wesentliche Punkte für die variable Disposition hervorzuheben. Dies sind die Materialverfügbarkeit, die hydrologische Vorgeschichte und die Landnutzung.

Die Verfügbarkeit von mobilisierbarem Material ist die Grundvoraussetzung für ein Murereignis. Dementsprechend kann es nach dem Abgang einer Mure über längere Zeiträume, trotz intensiver Niederschläge zu keinem Ereignis kommen, sofern nicht genügend Material nachgeliefert wurde. Als Beispiel dafür kann die Untersuchung von JOMELLI et al. (2003) angeführt werden. Sie integrierten in ihre Analyse der Muraktivität die Anzahl der Tage mit Frost seit dem letzten Ereignis als Proxie für die Schuttproduktion. In der vorliegenden Untersuchung wurde aber keine Materiallimitierung berücksichtigt.

Die hydrologische Vorgeschichte kann eine wichtige Rolle spielen. Von ihr hängt die Sättigung und Speicherfähigkeit des Substrates zu Beginn des Niederschlagsereignisses ab. Dementsprechend ändern sich die Infiltrations- und Abflussbedingungen und sorgen für eine unterschiedliche Reaktion. Die Berücksichtigung wird im folgenden Kapitel beleuchtet.

Ein wichtiger Bestandteil der variablen Disposition ist auch die Vegetation und damit die Landnutzung. Dies ist ein Punkt, über den der Mensch massiv in das System eingreifen kann. In vielen Fällen mag die Vegetation keine Rolle spielen, da sich die Anrissgebiete in Felsrinnen oder Schutthalden unterhalb von Felswänden befinden und entsprechend keine Vegetation im Einzugsgebiet vorhanden ist. Es gibt aber auch zahlreiche andere Fälle von Anrissen in bewachsenen Gebieten bzw. bei Anrissen in tieferen Bereichen von Gerinnen und Wildbächen.

In RIEGER (1999, 42) werden wichtige Punkte für den Einfluss der Vegetation auf die Disposition beschrieben:

1. Die Vegetation verändert die Infiltration und Wasserspeicherung des Substrates, wodurch Abflussspitzen durch Oberflächenabfluss generell vermindert werden.
2. In den Anrisszonen selbst spielt die Vegetation kaum eine Rolle, da sie sich hier aufgrund der hohen Aktivität zumeist nicht halten kann bzw. eine Ansiedelung unterbunden wird.

Der erste Punkt basiert auf der Tatsache, dass die Vegetation durch die Interzeption und die Evapotranspiration die Wassermenge die zur Infiltration bzw. in weiterer Folge zur Speicherung im Substrat zur Verfügung steht reduziert wird. Dadurch wird, zumindest am Beginn der Ereignisse der Oberflächenabfluss deutlich reduziert (vgl. MÜLLER und MÜNCH 2002). Ein weiterer Punkt im Zusammenhang mit dem Oberflächenabfluss ist die veränderte Rauigkeit der Oberfläche durch die Vegetation. Dadurch wird dieser verlangsamt und die Reaktion des Systems entsprechend träge (SIDLE und OCHIAI 2006, 90). Diese Effekte sind vor allem für Anrisse im Gerinne von Bedeutung und in der Hydrologie und Wasserwirtschaft intensiv erforscht (z.B. MARKART et al. 2000, VALTYNI und HRONCEK 2000, KOVAR et al. 2004).

Wurzelgänge und ähnliches können allerdings auch zur besseren Infiltration führen. Das mag für die Abflussbildung zwar positiv sein, fördert aber die Durchnässung des Substrates. Auf Hangmuren bzw. initiale Rutschungen kann sich dies entsprechend negativ auswirken da die Stabilität einer Masse reduziert werden kann (SIDLE und OCHIAI 2006, 90).

Der zweite Punkt von RIEGER (1999) trifft für unbeeinflusste und hochaktive Gebiete zu. In Bereichen mit menschlichen Eingriffen ist dieser Punkt aber wohl etwas anders zu sehen. So kann in Umkehrung der Situation in bisher inaktiven Gebieten die Entfernung oder Schädigung der Vegetation zu neuen Anrissgebieten führen. Dabei spielen neben dem Abfluss auch die stabilisierende Wirkung des Wurzelgeflechts eine Rolle. Im Gegenzug ist aber bei Wiederaufforstungen das zusätzliche Gewicht der Vegetation zu beachten (SIDLE und OCHIAI 2006, 90 und 94ff).

2.5.2. Auslösung

Allgemein betrachtet wird die Zugabe von Wasser in das System als Auslöser von Muren angesehen. Das kann durch Schmelzwasser oder Niederschläge geschehen. Für kleine, in Muren übergehende Rutschungen entwickelte CAINE (1980) eine Formel, welche die mindest erforderliche untere Niederschlagsgrenze angibt (abhängig von Intensität und Dauer). Zu diesem Thema gibt es eine Vielzahl weiterer Untersuchungen, die sich mit dem Zusammenhang zwischen Niederschlagsintensität und Murauslösung beschäftigen (z.B. BLIJENBERG 1998; BLIJENBERG et al. 1996; WEI et al. 2008). Hier ist vor allem auch von Bedeutung welchen Auslösungsmechanismus man betrachtet. So spielt bei der Auslösung der Rutschung die hydrologische Vorgeschichte und damit die Bodenfeuchte eine wichtige Rolle. Im Fall einer Auslösung in Felsrinnen oder Schuttfächern spielt diese aufgrund der hohen Durchlässigkeit des Materials kaum eine Rolle.

Es ist aber wichtig, den Niederschlag immer im Zusammenhang mit dem Dispositionsmodell zu sehen. Es gibt im Regelfall keine pauschal gültige Größe. Sowohl regional als auch innerhalb eines Gebietes kann der Grenzwert für die Auslösung eines Ereignisses schwanken, und zwar nicht nur räumlich sondern auch zeitlich. Deshalb werden in entsprechenden Berechnungsmodellen (z.B. GLADE et al. 2000) nicht nur ein einzelnes Niederschlagsereignis, sondern die hydrologische Geschichte über einen längeren Zeitraum betrachtet. Auch die Arbeit mit Wahrscheinlichkeiten wird hier angewendet um Grenzen und Bereiche möglicher Ereignisse anzugeben (z.B. GLADE 2000).

2.6. Aktivität und Ursachen

Viele Untersuchungen zur generellen Erhebung von Zeitreihen datieren Ablagerungen am Murfächer und arbeiten in einer Zeitspanne die das ganze Holozän abdeckt. Für die Korrelation mit aktuellen bzw. historischen Klimaveränderungen beziehungsweise dem Einfluss der menschlichen Aktivität (Landnutzungswandel) sind vor allem Zeitperioden von rund 50 bis 150 Jahren von Interesse, diese aber dafür in einer entsprechend hohen zeitlichen Auflösung.

In diesem Abschnitt soll ein Abriss gegeben werden, mit welchen Methoden, über welche Zeiträume und räumliche Ausdehnung Untersuchungen zur Muraktivität durchgeführt worden sind. Zusätzlich sollen die berücksichtigten Einflüsse und Veränderungen in den Untersuchungsgebieten erwähnt werden um einen Überblick zu erhalten, welche Forschungen mit ähnlichem Inhalt wie der vorliegenden Arbeit bereits durchgeführt wurden.

Untersuchungen die sich mit der Aktivität oder der räumlichen Verteilung der Ereignisse beschäftigen finden vor allem in einzelnen Gerinnen oder Murfächern statt. So wurde zum Beispiel eine Bergflanke in der Schweiz mithilfe dreier Luftbilder auf ihre Muraktivität und den Zusammenhang mit der Errichtung von Schutzdämmen und Rückhaltebecken untersucht (BOLLSCHWEILER et al. 2005). Mithilfe von 12 Luftbildern über 47 Jahre wurde in Neuseeland die Aktivität von Rutschungen im Zusammenhang mit Niederschlagsereignissen untersucht (HUFSCHMIDT und CROZIER 2008).

Ein anderes Beispiel wäre die dendrogeomorphologische Untersuchung zur Ablagerungsgeschichte auf einem Murfächer über die letzten 140 Jahre (BOLLSCHWEILER et al. 2007).

Dendrochronologie und Lichenometrie wurde im Bachelard-Tal (südlich von Barcelonnette) auf einer Fläche von rund 10 km² mit 130 Murkanälen von VanASCH und VanSTEIJN (1991) angewendet um die Aktivität zu ermitteln.

Hydrologische Modelle setzte DEHN (1999) ein, um die künftige Aktivität von Hangrutschungen unter veränderten Klimabedingungen zu untersuchen.

Untersuchungen, die neben dem Auslöser Niederschlag noch weitere Parameter berücksichtigen sind eher selten anzutreffen.

Den Einfluss von Permafrostdegradation im Zuge des Klimawandels auf die Muraktivität behandeln zum Beispiel ZIMMERMANN und HAEBERLI (1992). Auch RICKENMANN und ZIMMERMANN (1993) heben die Bedeutung der periglazialen Bereiche als Startgebiete der Muren hervor. ZIMMERMANN et al. (1997) befassen sich generell mit dem Einfluss von Klimaänderungen auf die Murgefahr.

Den Einfluss der Landnutzung auf die Aktivität eines Schwemmfächers (Mur- und fluviale Ablagerungen) untersuchte GARFI et al. (2007) anhand des Bewuchses mit Luftbildern. Vegetationsänderungen, aber auch das Klima wurden bei der Analyse der Aktivität von Rutschungen von DAPPLES et al. (2002) für das Holozän untersucht.

Frosttage seit dem letzten Ereignis, als Proxy für die Materialnachlieferung (Schuttproduktion) wurde von JOMELLI et al. (2003) in ihrer Analyse der Muraktivität anhand von 12 Luftbildern berücksichtigt.

Klimatische und anthropogene Einflüsse auf alpine Wildbäche in Barcelonnette wurden von FLEZ und LAHOUSSE (2003) und FLEZ und LAHOUSSE (2004) ermittelt. Wobei die erste Untersuchung die Gerinnebreite anhand von Luftbilder (1948 – 2000) erhob, während die zweite stratigraphische Methoden verwendete und das gesamte Holozän abdeckt.

Erwähnt werden soll an diesem Punkt auch generell das TESLEC – Programm der EU. Wie der Name „The temporal stability and activity of landslides in Europe with respect to climatic change“ bereits sagt handelt es sich um Untersuchungen zur Aktivität von Massenbewegungen und ihrem Zusammenhang mit den klimatischen Bedingungen. DIKAU und SCHROTT (1999) geben einen Überblick über die Aktivitäten innerhalb des Programmes, in dessen Rahmen auch ein Sonderband der Zeitschrift *Geomorphology* (Nr. 30, 1999) erschienen ist. Dabei handelt es sich um das Nachfolgeprojekt von EPOCH (Temporal occurrence and forecasting of landslides in the European Community – European programme on climate and natural hazard). In dessen Rahmen wurden Klassifikationen zum zeitlichen Auftreten erarbeitet und die Frequenz und Magnitude von gravitativen Massenbewegungen in der Vergangenheit erhoben (DIKAU und SCHROTT 1999).

3 Datengrundlage

Für die vorliegende Arbeit standen eine Vielzahl von Daten zur Verfügung, die im Rahmen von vorangegangenen Untersuchungen im Barcelonnette Gebiet erhoben wurden. Die Daten wurden vom „Observatoire Multidisciplinaire des Instabilités de Versants“ (OMIV) zusammengetragen und für weitere Untersuchungen zur Verfügung gestellt. Weiters steht eine Vielzahl an wissenschaftlichen Publikationen des Gebietes und das Thema betreffend direkt über die Homepage (<http://eost.u-strasbg.fr/omiv/>) zur Verfügung.

Folgende Daten des OMIV wurden bei der Bearbeitung verwendet:

- Orthofotos der Jahre 1974, 1982, 2000 und 2004
- Luftbilder der Jahre 1956 und 1995
- Digitales Gelände Modell (DGM)
- Geologie
- Landnutzung von 1974, 1982 und 2000
- Niederschlagsdaten

3.1. Orthofotos und Luftbilder

Während die vier vorhandenen Orthofotos ohne weitere Vorarbeit übernommen werden konnten, mussten die beiden Luftbildserien von 1956 und 1995 zuerst orthorektifiziert werden.

Dieser Prozess ist erforderlich, da es sich bei den Luftbildern um einzelne „fotographische“ Aufnahmen handelt. Diese sind mit einer Flughöhe von rund 5 bis 6 km aufgenommen, entsprechen geometrisch einer Zentralprojektion und sind nicht verortet. Um nun aus den verzerrten, einzelnen Bildern ein zusammenhängendes Orthofoto zu erzeugen ist eine Vielzahl an Parametern und Arbeitsschritten erforderlich. Zum einen müssen die Kameraparameter (Brennweite, Bildhauptpunkt, Bildmarken) bekannt sein, um die Koordinaten des Aufnahmepunktes berechnen zu können. Ein DGM ist ebenfalls erforderlich, da es in Gebieten mit großen Höhenunterschieden zu Verzerrungen durch die Topographie kommt (unterschiedlicher Kameraabstand, Neigung der Flächen zur Kamera).

Mit Hilfe von näherungsweise bekannten beziehungsweise berechenbaren Parametern wie der Größe der einzelnen Bilder in der Natur, deren Überlappungsgröße und der Flughöhe lassen sich initiale Koordinaten und Raumwinkel der Kamera für jedes einzelne Bild festlegen.

In einem weiteren Schritt werden die einzelnen Bilder mit sogenannten „tie points“ (TP's) zusammen gehängt. Üblicherweise befinden sich 9 Punkte auf einem Bild. Diese Punkte müssen sich im Überlappungsbereich der einzelnen Bildern befinden und sollten auf allen (üblicherweise 6) Bildern erkennbar sein (ERDS FIELD GUIDE 2005, 322). Die TP's bilden das geometrische Gerüst, mit dem die Bilder in einem weiteren Schritt entzerrt werden. Zusätzlich müssen aber noch sogenannte „ground control points“ (GCP's) gesetzt werden. Diese Punkte (im vorliegendem Fall aus dem Orthofoto von 2004 entnommen) verfügen über Koordinaten und in Verknüpfung mit dem DGM auch über Geländehöhen (ERDAS FIELD GUIDE 2005, 319). Somit verfügt das Modell über Fixpunkte und eine Topographie und die Luftbilder können in Orthofotos (Parallelprojektion) mit einheitlichem Koordinatensystem umgerechnet werden.

Der Vorteil der gemeinsamen Bearbeitung aller Luftbilder, der sogenannten „aerial triangulation“ und im speziellen des Bündelblockausgleichs liegt in der Vereinfachung der späteren Nutzung. Die Bilder hängen in einem fixen Gerüst und Fehler werden über das gesamte Gebiet berechnet und korrigiert. Es entstehen keine bzw. deutlich geringere Versätze und Unstimmigkeiten an den Grenzen der einzelnen Bilder, die ja in einem weiteren Schritt zu einem Mosaik zusammengesetzt werden (ERDAS FIELD GUIDE 2005, 294).

Die Orthorektifizierung der Luftbilder wurde mit „ERDAS Imagine 9.1 – Leica Photogrammetrie Suite“ durchgeführt. Die Mosaikierung erfolgte ebenfalls mit ERDAS, wobei die Methode der „most nadir seamline“ zur Anwendung kam. Es wurden keine Mittelungen in überlappenden Bereichen vorgenommen.

Für die Neuberechnung der Pixel fiel die Wahl auf „cubic convolution“. Diese Methode erfordert zwar den meisten Rechenaufwand, sorgt aber für scharfe Grenzen und liefert auch bei der Verdrehung des Bildes gute Ergebnisse.

In Tabelle 2 sind einige Parameter der beiden Luftbildsequenzen von 1995 und 1956 sowie deren Orthorektifizierung festgehalten.

Sämtliche Werte die den Maßstab oder die Pixelgröße behandeln, sind für eine Geländehöhe von 1.070 m.ü.M. berechnet. Entsprechend handelt es sich um Minimalwerte und die geometrische Auflösung verbessert sich mit zunehmender Höhe des Geländes. Deshalb wurde die Auflösung der orthorektifizierten Bilder eine Stufe besser gewählt.

Durch die unterschiedliche Flughöhe und die Brennweite der verwendeten Kamerasysteme verfügen die Bilder von 1995 über einen größeren Maßstab. Der Unterschied in den Bildern

von 1995 liegt in einer unterschiedlichen Flughöhe von 4.800 bzw. 5.500 m.ü.M. Gescannt wurden sämtliche Bilder mit 600 ppi, wodurch ein Pixel im digitalisierten Bild rund 42,5 µm am Originalbild entspricht.

Der Gesamtfehler liegt bei den Bildern von 1956 relativ hoch, obwohl zusätzliche Punkte zur Verbesserung gesetzt wurden. Der Grund liegt wahrscheinlich in der geringen geometrischen und spektralen Auflösung (Grauwertbild), wodurch sich die Identifizierung von Punkten auf diesen Bildern sowie auf dem Referenzbild von 2004 schwierig gestaltete.

Tabelle 2: Parameter der orthorektifizierten Luftbilder von 1956 und 1995

	1956	1995
Anzahl der Luftbilder	29	45
Flughöhe [m.ü.M.]	6.000	5.500 bzw. 4.800
Brennweite [mm]	125	153
Maßstab (bei einer Geländehöhe von 1.070m.ü.M.)	1:39.400	1:28.900 bzw. 1:24.300
Scanauflösung [µm]	42,5	42,5
Pixelgröße des Scans in der Natur [m]	< 1,7	< 1,2 bzw. 1,0
Anzahl der TP's	109	108
Anzahl der GCP's	40	34
Gesamtfehler der Orthorektifizierung [Pixel]	3,16	1,79
Pixelgröße des Orthofotos [m]	1,5	0,75

Die sechs in der Untersuchung verwendeten Orthofotos weisen eine räumliche Auflösung von 0,5m (2000, 2004), 0,75m (1995), 1,0m (1974, 1982) und 1,5m (1956) pro Pixel auf. Sie schwankt also relativ stark. Allerdings kann nicht direkt von der hier dargestellten Auflösung auf die Qualität der Bilder geschlossen werden.

Spektral handelt es sich bei dem Bild von 1956 um ein 1-Kanal Bild (Grauwert), die restlichen fünf sind 3-Kanal-Bilder. Wobei es sich bei 1974 und 1982 um farb-infrarot Bilder handelt (Kanäle rot, grün, nahes Infrarot), während die anderen drei das RGB Spektrum darstellen.

Möglichst hoch aufgelöste (räumlich und spektral) und scharfe Bilder sind am besten geeignet um die Muren zu erkennen. Das Orthofoto von 2004 erfüllt diese Anforderungen am besten. Aber auch jenes von 1974 ist sehr gut. Die Bilder von 1982, 1995 und 2000 sind in ihrer Qualität ähnlich einzuschätzen und weisen nicht jene Schärfe der beiden anderen Bilder auf. Das Orthofoto von 1956 ist aufgrund der spektralen und geometrischen Auflösung als das schlechteste einzustufen.

3.2. Digitales Geländemodell (DGM)

Das digitale Geländemodell mit einer Auflösung von 10 m wurde durch Digitalisierung der Höhengichtlinien der topographischen Karten des IGN (Institute Geographique National) mit einem Maßstab von 1:10.000 bzw. 1:25.000 von THIERY (2007) erstellt. Für die Interpolation der einzelnen Pixelwerte wurde eine Routine von THIERY et al. (2006) verwendet die in Surfer umgesetzt wurde.

Es liegt für das gesamte Untersuchungsgebiet vor und dient als Grundlage für die Ermittlung der Hangneigungen, Einzugsgebiete und Höhenlage der Murereignisse.

3.3. Geologie

Für das gesamte Untersuchungsgebiet gibt es einen Vektordatensatz in dem die Untergrundverhältnisse verzeichnet sind. Dieser wurde durch die Digitalisierung der geologischen Karte 1:50.000 von Barcelonnette erstellt.

Das digitalisierte Gebiet umfasst 10 verschiedene Kategorien, wobei folgende 8 im Untersuchungsgebiet zu finden sind:

- Kalk (Limestones)
- Blockschutt (Blocks)
- Lakustische Sedimente (Lacustrine deposits)
- Moränenmaterial (Moraines)
- Hangschutt (Screes)
- Flysch (Flyschs)
- Fluviale Ablagerungen (Torrential deposits)
- Verwitterte Mergel (Weathered marls)

Die beiden Gruppen Blockschutt und Hangschutt werden nicht nach der Materialherkunft (Flysch- oder Kalk) unterschieden. Da diese Zuordnung aber für die vorliegende Untersuchung von Interesse ist wird diese Untergliederung in Abhängigkeit des Ursprungs des Materials vor der Verwitterung durchgeführt.

3.4. Landnutzung

Drei Datensätze der Landnutzung liegen für das Untersuchungsgebiet vor und werden in der vorliegenden Arbeit berücksichtigt. Die Landnutzung von 2000 wurde von BORDONNE (2008) auf Basis des Orthofotos erstellt. Die beiden Datensätze zur Nutzung von 1974 und 1982 wurden von Monique Moine (Universität Straßburg) digitalisiert.

Die drei Datensätze weisen folgende 15 Kategorien auf:

- Nadelwald (coniferous forests)
- Nadelwald-mittlere bis geringe Dichte (coniferous forests-average to low density)
- Laubwald (broad-leaved forests)
- Natürliches Grünland (natural grassland)
- Ackerflächen/Dauerkulturen (arable land/permanent crops)
- Weideland/Almflächen (pastures)
- Unbedeckter Fels (bare rocks)
- Schwarze Mergel (black marls)
- Städtische Gebiete (urban fabric)
- Industrie- und Gewerbegebiete (industrial or commercial areas)
- Flugplatz (airdrome)
- Bergwerk, Schottergruben (mineral extraction site)
- Fließgewässer (water course)
- Marschen und Wasserflächen (marshes and water bodies)
- Überschwemmungsflächen (alluvial deposits)

Da für die vorliegende Arbeit nicht alle Klassen bzw. die detaillierte Unterteilung von Bedeutung ist, werden die Klassen für die Analyse zusammengefasst. Welche Klassen dies betrifft ist in Kapitel 4.6.1 beschrieben.

3.5. Niederschlag

Niederschlagsdaten für das Untersuchungsgebiet liegen von mehreren Stationen in unterschiedlicher zeitlicher Auflösung (6-Minuten bis täglich) und für unterschiedliche Zeitspannen (wenige Jahre bis Jahrzehnte) vor. Niederschlagsdaten die den gesamten Zeitraum der Untersuchung (1956 bis 2004) abdecken liegen nur von der Station Barcelonnette - Pont Long (04019001) vor. Dabei handelt es sich um tägliche Daten. Die Station liegt im Tal, wenige 100 m außerhalb des Ortes Barcelonnette auf 1.155 m Höhe und wird von Météo France seit 1923 betrieben (Lage siehe Abbildung 6).

Die Datenreihe hat allerdings einige Lücken, in denen die Messwerte fehlen. Im folgenden sind diese für den Untersuchungszeitraum aufgelistet. Auf die Bedeutung der fehlenden Daten wird in Kapitel 8 eingegangen.

Tabelle 3: Fehlende Niederschlagsdaten der Station Barcelonnette – Pont Long zwischen 1956 und 2004 (orange: komplett fehlend, gelb: teilweise fehlend)

	Jän.	Feb.	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.
1972												
1973												
1976												
1977												
1978												
1981												
1982												
1988												

4 Methodische Konzeption

Die vorliegende Arbeit untersucht die räumliche und zeitliche Variabilität von Murereignissen. Zu diesem Zweck ist als erstes eine Datenreihe mit Ereignissen erforderlich. Diese wurde durch die Kartierung der Orthofotos geschaffen. Damit ergab sich ein Inventar an Ereignissen, das den entsprechenden Zeitperioden zwischen den Aufnahmezeitpunkten der Orthofotos zugeordnet werden konnte. Für jedes Ereignis wurde die Höhenlage und die Hangneigung der Start- und Endpunkte, die Durchschnittsneigung und das hydrologische Einzugsgebiet ergänzt.

Durch den Vergleich verschiedener Untergliederungen (Geologie, Talseite) konnte die räumliche Verteilung und unterschiedliche Eigenschaften (Länge, Neigungen, Einzugsgebiet) der Muren in diesen Teilgebieten analysiert werden. Die zeitliche Variabilität wurde durch den Vergleich der einzelnen Zeitscheiben ermittelt. Sämtliche Unterschiede zwischen den Klassen bzw. Zeitscheiben sind mit statistischen Tests auf ihre Aussagekraft überprüft worden.

Nach dieser Analyse wurden die Murereignisse mit den Landnutzungsdaten überlagert. Damit sollte getestet werden ob diese einen Einfluss auf die Murtätigkeit im Untersuchungsgebiet hatte. Danach erfolgte ein Vergleich der Muren und ihrer Eigenschaften mit den Niederschlagsdaten. Auch hier sollte der Einfluss ermittelt werden und ein möglicher Zusammenhang hergestellt werden.

4.1. Kartierung

Die Kartierung der Murereignisse erfolgte in ArcGIS 9.3 anhand der vorhandenen Orthofotos. Sofern erkennbar wurden folgende Teile des Murereignisses getrennt kartiert:

- Startgebiet (Fläche)
- Murkanal (Linie)
- Ablagerungsgebiet (Fläche)
- Anfangspunkt des Murkanals (Punkt)
- Endpunkt des Murkanal (Punkt)

Der Murkanal selbst war das entscheidende Kriterium und wurde als erstes kartiert. Sofern erkennbar wurden in weiterer Folge das zugehörige Startgebiet (Anrissbereich) und das Ablagerungsgebiet ebenfalls digitalisiert. Der Anfangs- und Endpunkt des Murkanals ist für

jedes Ereignis zusätzlich als Punkt eingetragen worden. Diese beiden Features dienen der Kombination mit anderen Daten wie zum Beispiel dem DGM (Auslesen der Höhendaten und Neigungen) und der Ermittlung des hydrologischen Einzugsgebietes.

Sämtliche getrennt kartierten Features eines Ereignisses verfügen über eine eindeutig zuordenbare Nummer, wodurch die einzelnen Elemente kombiniert betrachtet und analysiert werden konnten. Sämtliche Features sind für jeden Zeitabschnitt eingerichtet worden und gemeinsam in einer „Personal Geodatabase“ bearbeitet worden.

Der Kartierungsprozess selbst erfolgte durch den visuellen Vergleich von zwei aufeinander folgender Orthofotos. Dementsprechend ergeben sich fünf Zeitscheiben, die jeweils nach dem Jüngeren der beiden zu vergleichenden Fotos benannt wurden. Somit ergaben sich die in Tabelle 4 dargestellten Zeitscheiben:

Tabelle 4: Bezeichnung, Zeitraum und Dauer der verwendeten Zeitscheiben

Bezeichnung	Abgedeckter Zeitraum	Dauer der Zeitscheibe (Jahre)
1974	1956-1974	18
1982	1974-1982	8
1995	1982-1995	13
2000	1995-2000	5
2004	2000-2004	4

Beim Kartierungsprozess wurde das gesamte Untersuchungsgebiet am Jüngeren der beiden Fotos systematisch nach Murereignissen abgesucht. Festgestellt wurde ein solches durch seine kanalartige Struktur in der Transitzone (dem Murkanal). Zusätzlich kann noch ein etwaig erkennbares Ablagerungsgebiet bei der Identifikation helfen. Wenn ein solches Ereignis identifiziert wurde, erfolgte der Vergleich mit dem älteren Foto. Sollte die Struktur auf dem älteren Foto nicht zu finden sein bzw. sich in Form oder Lage deutlich unterscheiden, so wird das Ereignis als „neu“ eingestuft und entsprechend kartiert. Sofern es mit der Struktur auf dem älteren Foto aber übereinstimmt gilt es als „alt“ und wird verworfen. Durch diese Methodik werden lediglich Ereignisse kartiert die in der entsprechenden Periode aufgetreten sind. In der folgenden Abbildung ist ein Beispiel für die Kartierung dargestellt. Im linken Teil sieht man das Orthofoto vom Jahr 2000. In der Mitte ist zum Vergleich jenes vom Jahr 2004 und rechts das kartierte Ereignis. Der Startpunkt wurde am Beginn des Kanals gesetzt der in der Rinne deutlich zu sehen ist. Das Ablagerungsgebiet beginnt in dem Bereich, an dem sich die Mure ausbreitet und abgelagert, obwohl der Kanal noch weiter innerhalb der Ablagerung zu sehen ist.

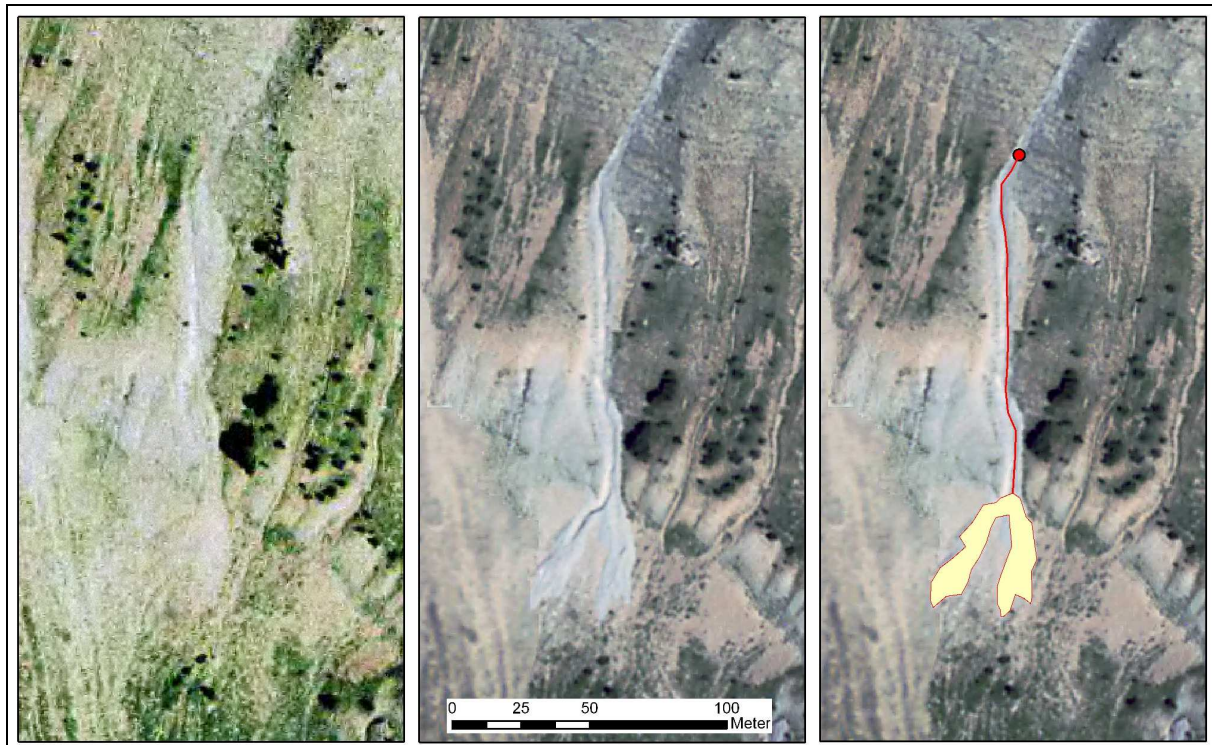


Abbildung 3: Beispiel der Kartierung der Orthofotos (links: 2000; mitte: 2004; rechts: 2004, kartiert)

Allerdings ergeben sich durch dieses Vorgehen zwei Problemfelder. Das erste betrifft Bereiche und Kanäle mit sehr hoher Aktivität. Wenn in diesen regelmäßig Ereignisse auftreten und sich das Anriss- und Ablagerungsgebiet auf den Orthofotos nicht deutlich unterscheiden, werden diese Ereignisse nicht erfasst. Dieser Fall kann zum Beispiel beim Erreichen von Gerinnen bzw. Ablagerungen in Gerinnen auftreten, da diese kaum von Dauer sind. Der zweite Fall tritt ein, wenn eine Struktur aufgrund der Bildqualität auf dem älteren Orthofoto nicht erkennbar ist. Dann wird diese auf dem nachfolgenden Foto als „neu“ eingestuft und kartiert, obwohl das Ereignis bereits in einer vorangegangenen Periode aufgetreten ist. Um dieses Problem einzuschränken bzw. mehrfache Kartierungen eines Ereignisses zu vermeiden, wurde ein zusätzlicher Schritt eingebaut. Sollte auf dem Vorgängerfoto die Bildqualität im betrachteten Bereich vergleichsweise schlecht sein und die Identifikation von Strukturen deutlich erschwert, so wird zusätzlich das nächst ältere Orthofoto herangezogen. Sofern auf diesem die Struktur erkennbar ist gilt sie als „alt“ und wird verworfen, ansonsten erfolgt die Kartierung.

Im Fall der Kartierung des Orthofotos von 1974 war dieser Vergleich nicht möglich da 1956 das älteste verfügbare Orthofoto ist. Allerdings ist gerade hier das Problem häufig anzutreffen, da jenes von 1956 im Vergleich eine deutlich schlechtere räumliche als auch spektrale Auflösung aufweist.

Verifizierung und Felderhebung

Die Kartierung des Orthofotos von 2004 wurde bei einem Feldbesuch im Mai/Juni 2009 verifiziert. Dabei wurden Gebiete im Riou-Bourdoux (westlicher Weg in Abbildung 4) und im Faucon (östlicher Weg in Abbildung 4) abgegangen. Ziel war es, festzustellen ob es sich bei den kartierten Strukturen tatsächlich um Murereignisse handelt oder ob diese Festlegung nach einer direkten Betrachtung im Feld verworfen werden muss. Abbildung 4 zeigt die Strecke die im Rahmen der Überprüfung begangen wurde und die Murereignisse von 2004. Die kartierten Muren wurden auch im Feld generell als solche interpretiert. Im Bereich des Faucon wurden zahlreiche kleinere Gerinne besichtigt. Diese blieben weiterhin ausgeschlossen, da sie zum einen nicht eindeutig dem Murprozess zugeordnet werden konnten und auch keine Veränderungen in der Zeit aufweisen. Die Kartierung der restlichen Orthofotos wurde nach der Feldbegehung unverändert weiter geführt, da keine Abweichungen oder Fehler zwischen der Kartierung und der Felduntersuchung festgestellt werden konnten.

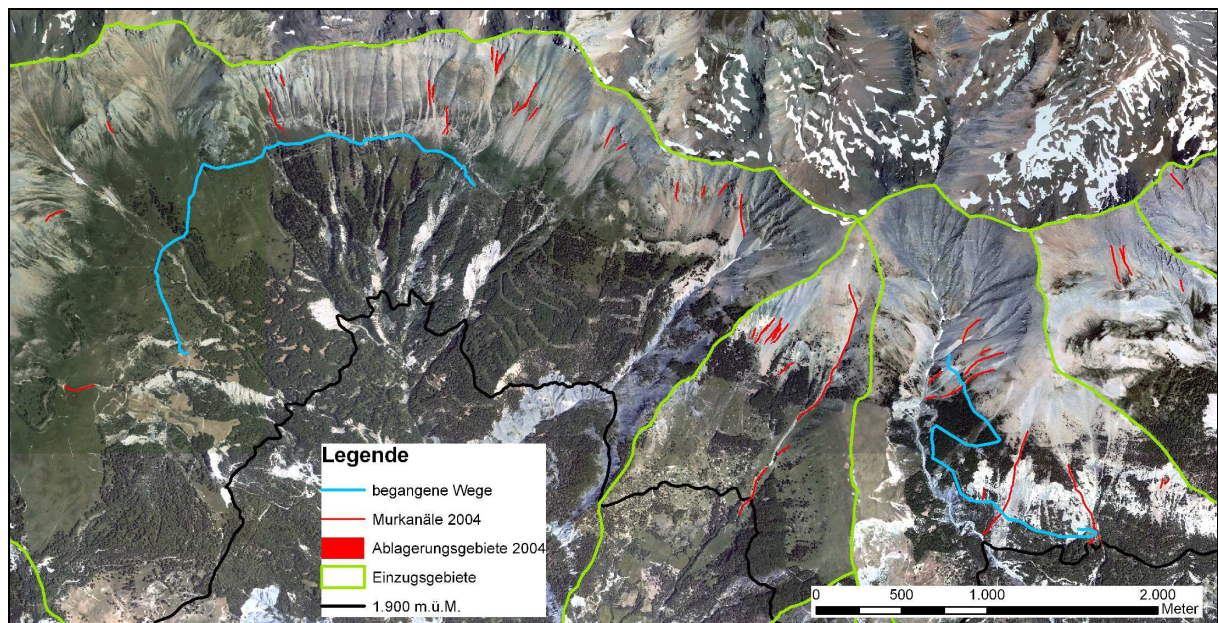


Abbildung 4: Verifizierte Bereiche des Untersuchungsgebietes

4.2. Verknüpfung und Berechnung von zusätzlichen Informationen

In diesem Abschnitt soll die Berechnung von Derivaten und die Kombination der kartierten Murereignisse mit den zusätzlich zur Verfügung stehenden Daten und den berechneten Derivaten behandelt werden. Diese ermöglichen die Ableitung wichtiger Eigenschaften für die Analyse.

4.2.1. Höhendaten und Neigungen

Die Höhendaten der Start- und Endpunkte des Murkanals wurden durch die Verschneidung mit dem DGM in ArcGIS ergänzt. Zu diesem Zweck wurde das DGM (Rasterdatensatz) in einen Featuredatensatz umgewandelt. Jedes Pixel wurde dabei in einen Punkt umgewandelt. Dieser liegt im Zentrum des Pixels und weißt dessen Höhenwert auf. Mithilfe des Befehls „spatial join“ kann nun den Start- und Endpunkten der einzelnen Murkanäle der Höhenwert des nächstgelegenen Punktes (also jener des Pixels des DGM auf dem die Punkte liegen) zugewiesen werden.

Diese beiden Höhendaten werden neben der primären Verwendung für Vergleiche in der Start- und Endhöhe der Murereignisse zur Ermittlung des durchschnittlichen Gefälles und des Höhenunterschiedes der Murkanäle herangezogen.

Zur Ermittlung der Neigung der Start- und Endpunkte des Murkanals wird aus dem DGM die Hangneigung berechnet. Dies erfolgt mit Hilfe des Spatial Analyst im ArcGIS. Danach wird die selbe Prozedur wie bei der Verschneidung der Höhendaten angewendet, um die Neigungswerte mit den entsprechenden Punkten zu verschneiden.

4.2.2. Hydrologisches Einzugsgebiet der Murereignisse

Die Ermittlung des hydrologischen Einzugsgebietes bezieht sich auf den Startpunkt des Murkanals. Für diese Berechnung wurde zuerst ein File für die Fließrichtung des Wassers mit Hilfe des Befehls „Flow Direction“ aus dem DGM erzeugt. Durch die Eingabe der Startpunkte der Berechnung und der Fließrichtung konnte in weiterer Folge mit dem Befehl „Watershed“ das Einzugsgebiet ermittelt werden. Allerdings ergaben sich dabei folgende Probleme:

1. Aufgrund der Lagefehler der einzelnen Datensätze liegen zum Teil die Startpunkte der Murkanäle im DGM nicht wie am Orthofoto kartiert in den Rinnen bzw. Tiefenlinien des Geländes.
2. Liegen zwei Murereignisse topographisch untereinander, wird das Einzugsgebiet des oberen Ereignisses nur diesem zugeschrieben und fehlt beim tiefer liegenden Ereignis.
3. Bei größeren Einzugsgebieten kann es zum plötzlichen „abreißen“ der Fläche kommen.

Aufgrund dieser auftretenden Probleme wurde eine andere Vorgehensweise herangezogen. Es wurde mithilfe des Befehls „Flow Accumulation“ ein Gewässernetz erzeugt. Mit diesem

Befehl wird für jedes Pixel berechnet, wie viel Wasser bzw. Fläche ihm zuströmt. Dieser Wert kann nun, wie bereits mit den Höhenwerten und der Hangneigung geschehen, den Startpunkten zugeordnet werden. Um aber noch die Lage der Startpunkte in Bezug auf die Rinnen bzw. Tiefenlinien zu korrigieren wurde ein Zwischenschritt durchgeführt. Dabei wurde ein „moving window“ auf den Datensatz angewendet und dem Zentralpixel der Maximalwert der umliegenden Pixel zugeordnet. Als Radius wurde ein Pixel, also 10 Meter ausgewählt um die Ungenauigkeiten der Lage auszugleichen. Die Umsetzung im ArcGIS erfolgte über den Befehl „Focal Statistics“. Die Suchmaske war ein Kreis mit einem Pixel als Radius.

Allerdings wird bei dieser Methode das hydrologische Einzugsgebiet nicht grafisch ausgewiesen, was als großer Nachteil angesehen wird. Um gegebenenfalls die Lage und Orientierung des Einzugsgebietes abzuschätzen wurde weiterhin die ursprünglich erzeugte, fehlerhafte Berechnung verwendet.

4.2.3. Einzugsgebiete und Geologie

Ein weiterer Schritt war die Ergänzung des Flusseinzugsgebietes in dem sich der Murgang ereignet hat sowie die Geologie im Bereich des Startpunktes und die Landnutzungsklasse. Der Startpunkt wurde deshalb als entscheidend ausgewählt, da an dieser Stelle und in dem dort vorkommenden Material der initiale Fehler auftritt.

Alle Eigenschaften wurden manuell in die Attributtabelle der Murgangsfeatures eingetragen, wobei entsprechend der zur Verfügung stehenden Shapefiles eindeutig zuordenbare Nummernsysteme verwendet wurden.

Wie bereits in Kapitel 3.3. angedeutet, ist die Geologie in anbetracht der zu untersuchenden Zusammenhänge etwas zu verändern. Zwar wird prinzipiell die Geologie gemäß des vorhandenen Datensatzes ausgelesen, für die Analyse spielt aber die Untergliederung zwischen Kalk, Flysch und anderem Material eine wichtige Rolle. Entsprechend werden die Schuttflächen unterhalb der Felsflächen der entsprechenden Geologie der Felswände zugeordnet. Sofern die Muren nicht unmittelbar unter den Felswänden liegen und der Ursprung des Materials daher nicht zugeordnet werden kann erfolgt die Zuordnung in die Kategorie „sonstiges“. Daher wurden die Kategorien Blockschutt und Hangschutt den beiden geologischen Einheiten zugeordnet. Die Analyse basiert in weiterer Folge generell auf dieser modifizierten Klassifikation. Betroffen von der Untergliederung war die nordexponierte Talseite, da hier sowohl Kalk als auch Flysch auftritt.

4.2.4. Export und räumliche Einschränkung

Sämtliche Attributtabeln wurden über das Übergabeformat „dBaseIV“ aus ArcGIS exportiert und in Excel importiert. Dabei wurde ein File erstellt, in dem über die Objekt ID der Muren sämtliche Informationen verknüpft sind und in Kombination betrachtet und analysiert werden können.

Für verschiedene Vergleiche wurde das Untersuchungsgebiet auf Bereiche mit einer Höhe von über 1.900 m Höhe beschränkt. Die Verteilung der Höhenlage, die Hangneigung aber auch die Landnutzung wurden auf diese Bereiche beschränkt. Somit wurden die Werte jeweils für das gesamte Untersuchungsgebiet aber auch für diesen begrenzten Bereich ausgelesen.

Die Höhe von 1.900 m wurde gewählt, da ab dieser Höhe die Startpunkte von Murereignissen häufig vorkommen. Darunter wurden lediglich zwei Ereignisse identifiziert.

4.3. Statistische Tests

Bevor auf die Methodik und Vorgehensweise bei der Beschreibung und Analyse der kartierten und verknüpften Daten eingegangen wird, soll an dieser Stelle noch auf die verwendeten statistischen Tests eingegangen werden.

Diese werden in weiterer Folge mehrfach und zu verschiedenen Punkten und Fragestellungen angewendet, weshalb sie an dieser Stelle vorab und pauschal beschrieben werden sollen.

Sämtliche statistische Untersuchungen wurden dabei mit Hilfe der Software SPSS 14.0.0 durchgeführt.

Im weiteren werden Tests auf Normalverteilung, nichtparametrische Tests sowie Korrelationsmethoden vorgestellt. Der Test auf Normalverteilung bildet dabei die Grundlage und ist das entscheidende Kriterium für die Auswahl eines geeigneten Tests.

4.3.1. Test auf Normalverteilung

Diese Tests dienen dazu, festzustellen ob ein Datensatz normalverteilt ist oder nicht. Von Normalverteilung spricht man dabei, wenn sich die Daten annähernd symmetrisch um den Mittelwert verteilen und somit eine glockenförmige Kurve erzeugen (BROSIUS 2006, 363).

Ob es sich bei einem Datensatz um eine Normalverteilung handelt oder nicht ist entscheidend dafür, welches Testverfahren in weiterer Folge angewendet werden kann.

Zur Bestimmung der Verteilung wird der Kolmogorov-Smirnov-Test verwendet. Dieser untersucht die Irrtumswahrscheinlichkeit mit der eine beobachtete Verteilung von einer normalen Verteilung abweicht (BROSIUS 2006, 401). Die asymptotische Signifikanz gibt diese Wahrscheinlichkeit an. Die Vertrauensgrenze wurde mit 0,05 festgelegt. Darunter wird eine allgemeine Verteilung unterstellt.

Sollte die Fallzahl unter 50 liegen ist zusätzlich der Shapiro-Wilks-Test durchzuführen, da der Kolmogorov-Smirnov-Test hier nicht mehr uneingeschränkt geeignet ist (BROSIUS 2006, 401).

4.3.2. Nichtparametrische Tests

Im folgenden werden die beiden verwendeten nichtparametrischen Tests vorgestellt. Diese stellen im Gegensatz zu den parametergebundenen Tests kaum Anforderungen an die vorhandenen Daten. Lediglich eine Ordinalskalierung ist erforderlich. Aus diesem Grund kamen sie auch zur Anwendung, da eine Normalverteilung in den meisten Fällen nicht gegeben war.

Beide in weiterer Folge erwähnten Tests bieten die Möglichkeit, Variablen verschiedener Gruppen miteinander zu vergleichen. Dabei wird getestet, ob die Daten einer einheitlichen Grundgesamtheit entstammen (BROSIUS 2006, 835). Die Tests reihen dabei die vorhandenen Werte einer zu untersuchenden Variable entsprechend ihrer Ausprägung und ermitteln für den mittleren Rang bzw. die Rangsumme eine Prüfgröße.

Verwendet werden der Mann-Whitney-Test bei zwei unabhängigen Gruppen (z.B.: Vergleich zwischen nord- und südexponierter Talseite) und der Kruskal-Wallis-Test für mehrere unabhängige Gruppen (z.B.: Vergleich der Zeitscheiben).

Über die asymptotische Signifikanz lässt sich die Aussagekraft der Ergebnisse und damit der Unterschied zwischen den Gruppen feststellen. Werte unter 0,05 zeigen, dass sich die Gruppen mit einer sehr geringen Irrtumswahrscheinlichkeit (unter 5%) unterscheiden und daher keiner gemeinsamen Grundgesamtheit entstammen. Dieser Wert wird als Grenze zwischen signifikanten und nicht signifikanten Ergebnissen verwendet.

4.3.3. Korrelationsanalyse

Um einen Zusammenhang zwischen zwei Variablen festzustellen wird eine Korrelationsanalyse durchgeführt. Dabei wird ermittelt wie stark der Zusammenhang zwischen zwei Variablen ist. Die Werte reichen dabei von „-1“ bis „+1“. Das Vorzeichen gibt

die Richtung, der Wert die Stärke des Zusammenhangs an. Zusätzlich wird noch die statistische Signifikanz angegeben. Wichtig dabei ist, dass immer ein linearer Zusammenhang unterstellt und damit geprüft wird (BROSIOUS 2006, 513).

Für die Stärke des Zusammenhangs werden die in der folgenden Tabelle angeführten Adjektive verwendet:

Tabelle 5: Bezeichnungen für die Stärke der Korrelation (BROSIOUS 2006, 519)

Betrag des Korrelationskoeffizienten	Mögliche Interpretation
0	Keine Korrelation
über 0 bis 0,2	Sehr schwache Korrelation
0,2 bis 0,4	Schwache Korrelation
0,4 bis 0,6	Mittlere Korrelation
0,6 bis 0,8	Starke Korrelation
0,8 bis unter 1	Sehr starke Korrelation
1	Perfekte Korrelation

Für die Produktmomentkorrelation nach Pearson ist eine Normalverteilung der Daten erforderlich. Ansonsten ist der Rangkorrelationskoeffizient nach Spearman anzuwenden, der lediglich eine Ordinalskalierung der Daten erfordert, und anstatt der tatsächlichen Werte die Rangplätze in der Berechnung berücksichtigt.

Als signifikante Ergebnisse werden jene mit einem entsprechenden Wert von unter 0,05 angesehen.

4.4. Räumliche Verteilung, Eigenschaften und Unterschiede

In einem ersten Schritt werden die kartierten Ereignisse in Bezug auf ihre räumliche Lage untersucht. Dazu wird die Verteilung hinsichtlich der Talseite und der Einzugsgebiete, sowie deren Fläche betrachtet. Weiters werden die Mureignisse in Anbetracht ihrer Höhenlage dargestellt und der Topographie des Untersuchungsgebietes gegenübergestellt.

Die geometrischen Eigenschaften der Muren und der Ablagerungsflächen, also Größe und Neigung sowie das Einzugsgebiet werden in einem weiteren Schritt dargestellt. Dabei wird die Neigung der Muren und des Untersuchungsgebietes, beziehungsweise der Bereiche über 1.900 m betrachtet und verglichen.

Es werden auch die Zusammenhänge der einzelnen Variablen betrachtet. Zu diesem Zweck werden diese mit Hilfe einer linearen Korrelation analysiert. Dabei sollen etwaige

Übereinstimmungen beziehungsweise Abhängigkeiten identifiziert werden um spätere Schlussfolgerungen zu erleichtern.

Als letzter, aber wesentlicher Punkt sollen in diesem Kapitel die Unterschiede innerhalb des Untersuchungsgebietes betrachtet werden. Zu diesem Zweck werden zwei unterschiedliche Klassifikationen verwendet. Diese werden in der weiteren Untersuchung immer wieder verwendet und stellen auch die Basis für die Beantwortung der zweiten Forschungsfrage dar.

Dabei wird zum einen zwischen der Talseite (nord- und südexponiert) unterschieden und zum anderen aufgrund der Geologie. Die Untergliederung aufgrund der Talseite erfolgt aufgrund der unterschiedlichen topographischen Gegebenheiten, der geologischen Verhältnisse, der prinzipiellen klimatischen Unterschiede und vor allem der unterschiedlichen Aktivität in der Vergangenheit (REMAITRE 2006, 77). Die Zugehörigkeit bzw. Unterteilung ist Tabelle 6 und Abbildung 6 zu entnehmen. Die Untergliederung der Geologie ist gedacht um festzustellen, ob etwaige Aktivitätsraten von der Geologie geprägt sind und ob diese unterschiedlich auf Veränderungen reagieren. Zusätzlich bietet diese Untergliederung eine wichtige zusätzliche Information in der Interpretation der Klassifikation nach der Talseite. Die Analyse entsprechend der Geologie erfolgt dabei gemäß Kapitel 4.2.3 in den Klassen Kalk, Flysch und Sonstiges.

In einem ersten Schritt werden dabei die Durchschnittswerte der einzelnen Klassen gegenübergestellt. Danach erfolgt die statistische Prüfung der Unterschiede zwischen den Klassen mit den zuvor beschriebenen nichtparametrischen Tests.

Wie bereits für den gesamten Datensatz durchgeführt, wird in diesem Zusammenhang auch wieder eine Korrelationsanalyse für die geologischen Klassen Kalk und Flysch durchgeführt. Dabei soll festgestellt werden, ob sich diese in den Gebieten deutlich unterscheiden oder konstant bleiben. Die Korrelation soll dabei eine Hilfestellung sein, um Unterschiede in den Teilgebieten leichter zu identifizieren.

4.5. Zeitliche Variabilität

Um die zeitliche Variabilität der Ereignisse zu untersuchen wird deren Auftretenshäufigkeit pro Jahr ermittelt. Dabei wird jeweils die Gesamtzahl der identifizierten Ereignisse einer Zeitscheibe durch die Anzahl der Jahre dividiert und die einzelnen Zeitscheiben gegenüber gestellt.

Dieses vorgehen bedeutet nicht das davon ausgegangen wird, dass die Murereignisse kontinuierlich über die gesamte Periode aufgetreten sind. Es dient lediglich der Vergleichbarkeit zwischen den einzelnen Zeitscheiben, da diese mit 4 bis 18 Jahren deutlich streuen.

Neben dieser Gegenüberstellung werden die Ereignisse innerhalb der einzelnen Zeitscheiben auch in Bezug auf die Talseite und die Geologie, wie bereits im vorangegangenen Abschnitt dargestellt, aufgegliedert.

In Anlehnung an eine Untersuchung von HUFSCHMIDT und CROZIER (2008) für Rutschungen, wird in der vorliegenden Arbeit die betroffene „Fläche“ ermittelt. Dabei werden zwei verschiedene Arten der Berechnung durchgeführt. Zum einen wird die Gesamtlänge der Muren herangezogen, im anderen Fall die Gesamtfläche der Ablagerungen. Diese Werte werden jeweils durch die Anzahl der Jahre der Zeitscheiben dividiert, um eine Rate des betroffenen Gebietes zu erhalten. Ziel ist es dabei, nicht lediglich die Anzahl, sondern auch das Ausmaß der Ereignisse in die Betrachtung mit einzubeziehen.

Die Eigenschaften der Murereignisse in den einzelnen Zeitscheiben, gegliedert nach den beiden verwendeten Klassifikationen, werden wiederum gegenübergestellt und einer statistischen Prüfung unterzogen. Wobei der Unterschied innerhalb einer Zeitscheibe, als auch zwischen den Zeitscheiben geprüft wird.

Mit diesen Daten und Analysen sind die Voraussetzungen für die Beantwortung der ersten und zweiten Forschungsfrage gegeben. Es kann geklärt werden ob sich die Aktivität verändert hat und ob dies auf alle unterschiedlichen Teilgebieten gleichermaßen zutrifft.

4.6. Einfluss auf die Variabilität

Um die Forschungsfrage drei und vier beantworten zu können, müssen die beiden hier untersuchten Einflussgrößen Landnutzung und Niederschlag in die Analysen miteinbezogen werden.

4.6.1. Landnutzung

Die vorhandenen Landnutzungsdaten der verschiedenen Zeitpunkte werden für die Einzugsgebiete der Wildbäche quantitativ miteinander verglichen. Dieser Vergleich erfolgt sowohl für das ganze Einzugsgebiet als auch für die Bereiche über 1.900 m Höhe. Auch die Trennung zwischen den beiden Talseiten wird durchgeführt.

In einem weiteren Schritt wird die Landnutzung im Startbereich der Muren, sowie in deren hydrologischen Einzugsgebiet betrachtet. Dabei soll untersucht werden in welchen Nutzungsklassen Muren entstehen können. Die Landnutzung im Einzugsgebiet stellt einen weiteren wichtigen Punkt dar, da von dieser der Wasserzustrom abhängt.

Um die Lage der Anrisse und etwaige Veränderungen der Landnutzung in Relation zu setzen, werden verschiedene Karten mit den Anrissen und der Landnutzung und ihrer Änderung dargestellt und analysiert.

Für die Untersuchung wurden die vorhandenen 15 Landnutzungsklassen zusammengefasst. Der Grund dafür ist die Vereinfachung der Analyse, bei gleichzeitig vernachlässigbarem Verlust an Informationen. Für die Analyse der Variabilität ist es nicht von Bedeutung um welche Art von Wald es sich handelt. Auch die Untergliederung der urbanen bzw. anthropogenen Strukturen (Gewerbe, Flugplatz usw.) ist für die vorliegende Untersuchung als nicht relevant erachtet worden.

Nach diesen Gesichtspunkten ergeben sich folgende Klassen die in der Analyse berücksichtigt werden:

- Wald
- Natürliches Grünland
- Ackerflächen, Dauerkulturen
- Weideflächen, Almen
- Felsflächen ohne Vegetation
- Schwarze Mergel ohne Vegetation
- Verbautes Gebiet

- Bergbau
- Gewässer

Die Unterscheidung zwischen Grünland und Weideflächen kann nicht aufgrund der Kartierung von Luftbildern erfolgen. Diese Kategorien weisen aufgrund der im wesentlichen gleichen Vegetation keine optisch erkennbaren Unterschiede auf. Sie werden aber nicht zusammengefasst, da es aufgrund der Beweidung zu unterschiedlicher Anfälligkeit der Gebiete kommen kann (Zerstörung der Grasnarbe, Huftritt oder Ähnliches).

4.6.2. Niederschlag

Für die Betrachtung des Zusammenhangs zwischen Niederschlag und Muraktivität, und deren Einfluss auf die vorhandene Verteilung sind möglichst hochauflösende Niederschlagsdaten wünschenswert. CAINE 1980 entwickelte dafür eine Formel, die den Grenzwert für die Auslösung angibt. Dabei wird die Intensität (mm/h) und die Dauer berücksichtigt. Generell ist davon auszugehen, dass vor allem kurze Starkniederschlagsereignisse im Bereich von Minuten bis Stunden die Muren auslösen (vgl. VanASCH und VanSTEIJN 1991, 523; VanASCH et al. 1999; BLIJENBERG 1998). Da Daten mit dieser zeitlichen Auflösung aber nicht für die gesamte Dauer zur Verfügung stehen wird auf tägliche Niederschlagswerte zurückgegriffen. Es wird angenommen, dass sich die auslösenden Starkniederschlagsereignisse in den täglichen Daten deutlich durchschlagen und somit als Näherung herangezogen werden können. Tägliche Daten wurden unter anderem auch von JOMELLI et al. (2003) in ihrer Untersuchung der Aktivität herangezogen.

Für eine Korrelation der Auftretenshäufigkeit mit den Niederschlagswerten werden verschiedene Methoden herangezogen. Wobei sämtliche Analysen sowohl mit der absoluten Anzahl an Ereignissen als auch mit der entsprechenden Rate durchgeführt werden. Bei Heranziehung der absoluten Anzahl wird davon ausgegangen, dass sämtliche Murgänge von einem einzelnen Ereignis ausgelöst worden sind.

Bei der Analyse wird zuerst der maximale Tagesniederschlag und der maximale 2-Tagesniederschlag der einzelnen Jahre herangezogen und betrachtet. Dabei wird in der Analyse davon ausgegangen, dass sämtliche Ereignisse einer Periode von einem einzelnen, dem stärksten Ereignis der Zeitscheibe ausgelöst wurden. Der maximale 2-Tagesniederschlag

wird im Sinne der Auslösung durch langandauernde Niederschläge und entsprechende Sättigung des Substrates verwendet. Der maximale Tagesniederschlag wird als Proxie für intensiven Oberflächenabfluss und entsprechende Aktivierung der Muren genutzt.

Bei beiden Werten wird jeweils nur der Maximalwert zwischen Mai und November berücksichtigt. Die Monate Dezember, Jänner, Februar, März und April wurden ausgeschlossen. Zwar finden sich auch in diesen Monaten Tage mit intensiven Regenfällen, aber in der Untersuchung von REMAITRE (2006, 80) wurden in diesen Monaten mit Ausnahme des März keine Murereignisse festgestellt. Dies ist für das hoch gelegene Untersuchungsgebiet auch zu erwarten, da in den betroffenen Bereichen der Einzugsgebiete (über 1.900 m Höhe) generell mit Schneefall statt Regen und einer entsprechenden Schneedecke zu rechnen ist.

Zur Analyse des Zusammenhangs erfolgt neben der visuellen Interpretation eine Korrelation zwischen den beiden Niederschlagsparametern und der Anzahl und Rate der Murereignisse. Zusätzlich wird noch die Anzahl der Tage mit Niederschlägen über 50 mm in der Korrelation berücksichtigt. Diese soll berücksichtigt werden um festzustellen, ob sich die Murereignisse zu mehreren Zeitpunkten zugetragen haben. JOMELLI et al. (2003) haben in ihrem Modell zur Muraktivität ebenfalls die Anzahl der Tage mit Niederschlag über einem Grenzwert herangezogen. Der Wert von 50 mm wurde ausgewählt, da Sommergewitter diese Menge pro Stunde erreichen können (REMAITRE et al. 2005).

Neben der Betrachtung eines möglichen Zusammenhangs zwischen Niederschlag und Muranzahl bzw. Aktivitätsrate soll auch untersucht werden ob es einen Zusammenhang zwischen dem Niederschlag und den geometrischen Eigenschaften bzw. dem Einzugsgebiet der Muren gibt. Dies wäre für die Beantwortung der Frage vier von Bedeutung. Denn es ist möglich, dass sich Veränderungen aufgrund verschiedener Ursachen nicht in der Anzahl, aber dafür in den Eigenschaften der Muren finden lassen.

Zu erwarten wäre etwa, dass mit zunehmender Intensität der Niederschläge die Größe des Einzugsgebietes abnimmt. Auch eine Zunahme der Länge der Murkanäle durch die größere Wasserverfügbarkeit oder die Verringerung der Neigung der Startpixel durch die stärkere Belastung wäre vorstellbar. Verwendet werden für diese Korrelation der maximale Tages- und der maximale 2-Tagesniederschlag einer Periode.

5 Untersuchungsgebiet

Im folgenden Abschnitt soll das Untersuchungsgebiet vorgestellt werden. Hierzu wird neben den allgemeinen Gesichtspunkten vor allem auf die für die Arbeit wichtigen naturräumlichen Gegebenheiten näher eingegangen.

5.1. Überblick und geographische Lage

Das Untersuchungsgebiet liegt im Südwesten Frankreichs, im Departement Alpes-de-Haute-Provence. Der Ort Barcelonnette, der im Zentrum des Untersuchungsgebietes im Ubaye-Tal liegt ist gleichzeitig Namensgeber des Bezirkes, in dem knapp 8.000 Einwohner leben. Er liegt rund 150 km Fahrstrecke von Nizza in Richtung Norden, und rund 30 km Fahrtstrecke westlich der italienischen Grenze (Col de Maddalena). Im Winter sind diese Routen aber aufgrund der Schneelage häufig gesperrt und das Tal ist nur von Westen erreichbar.

Geographisch wird dieses Gebiet zu den Seealpen gezählt, die sich vom Mittelmeer bis etwas nördlich des Tals erstrecken, bevor daran anschließend die Kottischen Alpen beginnen.

Barcelonnette liegt auf einer Höhe von rund 1.130 m.ü.M. auf den Koordinaten 44°23' Nord und 6°39' Ost.



Abbildung 5: Lage des Untersuchungsgebietes (Quelle: GOOGLE MAPS, 2009)

Das Tal weist in diesem Bereich einen relativ flachen Talboden von etwas mehr als einem Kilometer Breite auf. In diesem und auf den ins Tal hineinlaufenden Mur- und Schwemmfächern der seitlichen Zuflüsse befinden sich die Orte und Siedlungen der Bevölkerung. Die Berge um Barcelonnette erreichen knapp 3.000 m.ü.M. nördlich und rund 2.700 m.ü.M. südlich des Tals. In höher gelegenen Gebieten sind nur mehr vereinzelt ganzjährig bewohnte Gehöfte anzutreffen. Zwei Skistationen (Pra-Loup und Super-Sauze) am nordexponierten Hang auf rund 1.600 m.ü.M. bilden die Ausnahme.

Die Ubaye, die das Tal durchfließt, entspringt rund 40 km nordöstlich auf über 2.500 m.ü.M. und erreicht im Bereich von Barcelonnette eine Durchflussmengen von rund 10,9 m³/s im Jahresmittel. Das 1,5 jährliche Hochwasser liegt bei 62, das 10 jährliche bei 130 m³/s (PIEGAY und SALVADOR 1997). Entsprechend der Lage in den Alpen und dem Klima kommt es vor allem im späten Frühling und Frühsommer zu einem erhöhtem Abfluss.

Das Untersuchungsgebiet selbst, das im Rahmen der vorliegenden Diplomarbeit behandelt wird liegt zu beiden Seiten des Ubaye-Tals und umfasst 16 tributäre Einzugsgebiete, die in Abbildung 6 zu sehen sind. Diese liegen generell zwischen rund 1.100 m und 3.000 m.ü.M., unterscheiden sich aber sowohl in ihrer Größe als auch in ihren geologischen und morphologischen Gegebenheiten stark. Vor allem zwischen der nord- und der südexponierten Talseite bestehen wesentliche Unterschiede.

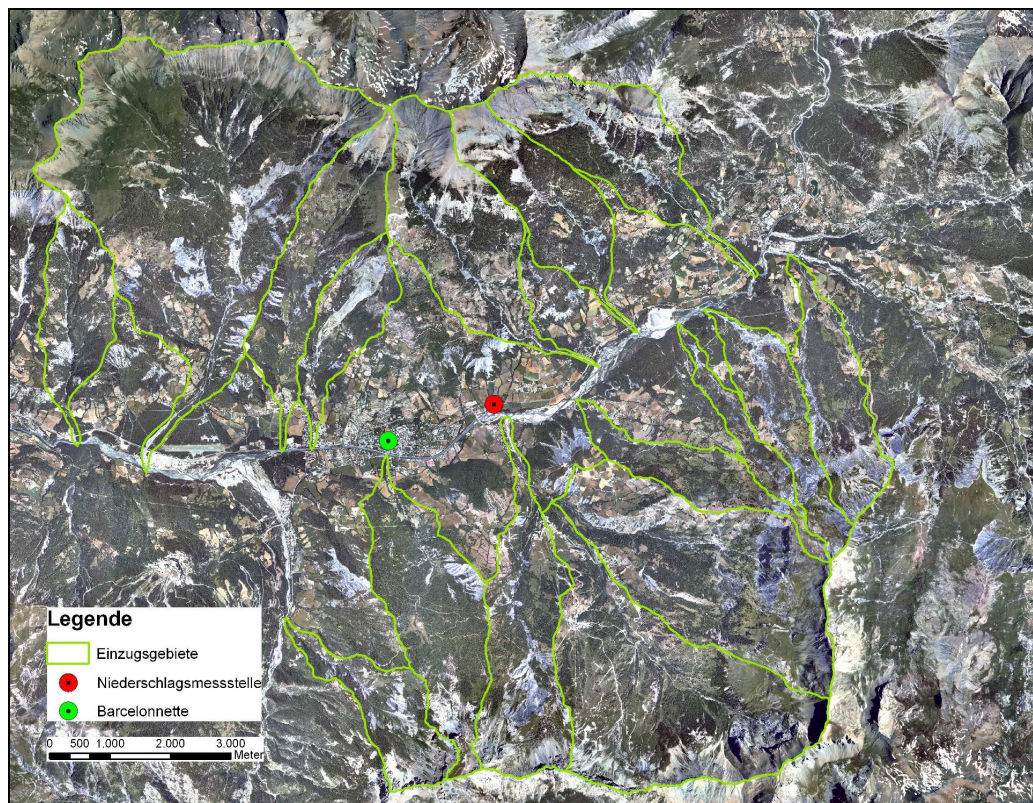


Abbildung 6: Überblick über das Untersuchungsgebiet und die Einzugsgebiete

Die sieben Einzugsgebiete der südexponierten Talseite sind (von West nach Ost) Berarde, Riou-Bourdoux, St.-Pons, La Valette, Faucon, Bourget und Sanières.

Nordexponiert liegen die 9 Einzugsgebiete (von West nach Ost) Riou-Chanal, Gaudeissart, Sauze, Enchastrayes, Bourre, Bramafan, Ribes, Poche und Frache.

Sämtliche südexponierte Einzugsgebiete erreichen direkt die Ubaye. Auf der nordexponierten Seite münden die Bäche Enchastrayes und Bourre rund 1,2 km vor der Mündung in die Ubaye auf rund 1.200 m.ü.M. in den Sauze. Die Bäche Riou-Chanal und Frache münden indirekt, aber bereits annähernd auf Talniveau (1.187 m bzw. 1.233 m) über größere Zuflüsse (Bachelard bzw. Rioux-Versant) in die Ubaye. Kenngrößen zu den einzelnen Einzugsgebieten sind der folgenden Tabelle zu entnehmen.

Tabelle 6: Flusseinzugsgebiete des Untersuchungsraumes

	Fläche [km]	Umfang [km]	Längserstreckung [km]	Mündungshöhe [m.ü.M.]	maximale Höhe [m.ü.M.]	Höhenunterschied [m]
südexponierte Talseite						
Berarde	3,05	9,42	3,77	1112	2476	1364
Riou-Bourdoux	18,80	22,60	7,18	1101	2849	1748
St-Pons	4,78	13,37	5,24	1119	2808	1689
La Valette	2,50	8,67	3,44	1127	2140	1013
Faucon	6,00	13,49	4,89	1171	2964	1793
Bourget	4,04	11,04	4,50	1188	2891	1703
Sanières	4,88	12,64	5,27	1215	2874	1659
nordexponierte Talseite						
Riou-Chanal	2,79	9,64	3,75	1187	2612	1425
Gaudeissart	5,54	13,33	5,42	1125	2651	1526
Sauze	5,55	14,59	5,92	1154	2651	1497
Enchastrayes	10,86	16,44	5,84	1250	2759	1509
Bourre	9,44	14,35	5,73	1240	2667	1427
Bramafan	2,55	11,31	4,07	1163	2567	1404
Ribes	1,30	8,66	3,88	1192	2242	1050
Poche	3,10	10,93	4,57	1199	2567	1368
Frache	3,54	10,88	4,55	1233	2380	1147

Die Einzugsgebiete unterscheiden sich zum Teil sehr stark. Vor allem die Flächen liegen zwischen 1,30 km² (Ribes) und 18,8 km² (Riou-Bourdoux). Die maximale Höhe im Untersuchungsgebiet ist 2.964 m im Einzugsgebiet des Faucon. Generell ist die maximale Höhe an der südexponierten Talseite mit Ausnahme der beiden Einzugsgebiete Berarde und La Valette höher als jene auf der nordexponierten Talseite. Die Höhenunterschiede sind daher auch in den südexponierten Gebieten größer.

5.2. Klimatische Bedingungen

Das Klima in der Region um Barcelonnette ist als inneralpines Trockenklima mit mediterranem Einfluss zu bezeichnen. Die Jahresniederschläge erreichen im Mittel rund 733 mm, schwanken aber stark um ± 412 mm (1928 bis 2002; REMAITRE et al. 2005, 340). Am niederschlagsreichsten sind die Monate September bis November, in denen im Mittel ~70-80 mm pro Monat fällt, während die Monate Februar und Juli mit ~45 mm die geringsten Niederschläge verzeichnen. Generell gibt es jeweils ein Maximum im Frühling und Herbst, während im Winter und Sommer ein Niederschlagsminimum liegt. Allerdings treten neben dem Herbst auch im Sommer Starkniederschlagsereignisse mit bis zu 50 mm/h auf (REMAITRE et al. 2005, 340).

Die Jahresmitteltemperatur liegt im Tal bei rund 7,3 °C. Im Dezember und Jänner ist im Mittel mit Temperaturen unter dem Gefrierpunkt zu rechnen (maximal bis –5 °C), wobei von November bis März negative Monatsmittel erreicht werden können. Im Sommer (Juli und August) sind Temperaturen von rund 16 °C der Normalfall, wobei 14-19 °C die Extremwerte darstellen (Daten der Station Barcelonnette 1963-2002, Météo France).

Da es sich um ein alpines Gebiet mit entsprechender Topographie handelt, sind die Temperatur und Niederschlagswerte nur für den Talbereich um Barcelonnette gültig. Wie in der Abbildung 7 zu sehen ist, muss mit zunehmender Höhenlage (vor allem auf der nordexponierten Seite des Tals) mit deutlich höheren Niederschlagswerten gerechnet werden. Bei den Temperaturwerten ist mit steigender Höhenlage mit einem Absinken entsprechend dem vorherrschenden Gradienten zu rechnen.

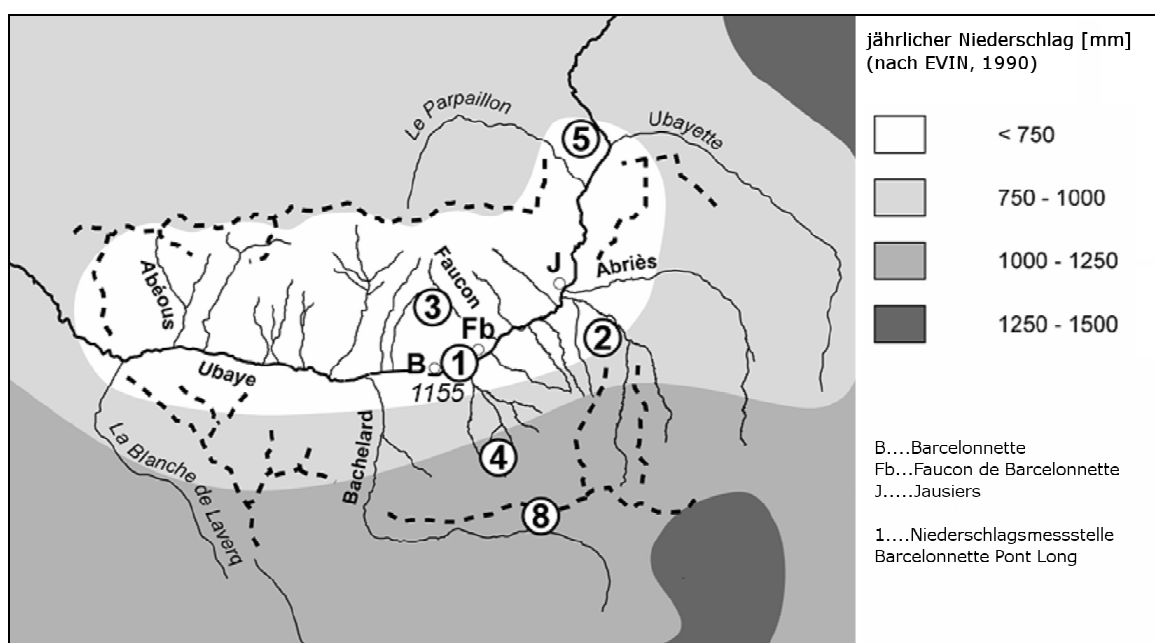


Abbildung 7: Niederschlagsvariabilität im Untersuchungsgebiet (REMAITRE 2006, 83, verändert)

5.3. Geologie und Geomorphologie

Das Gebiet um Barcelonnette stellt ein geologisches Fenster dar. In diesem Bereich sind die allochthonen Sandsteine („6“ in Abbildung 8), die zum Flysch gezählt werden abgetragen und die darunter liegenden autochthonen Schichten des Mesozoikums treten an die Oberfläche.

In Abbildung 8 sind die tektonischen Gegebenheiten des Gebietes zu sehen. Sehr schön tritt der Fensterbereich um Barcelonnette hervor, im dem die Flyschschicht, welche weiter gegen Nordosten unter einer weiteren Decke abtaucht fehlt, weil die unterlagernde Schichtfolge des Mesozoikums nach oben gewölbt ist.

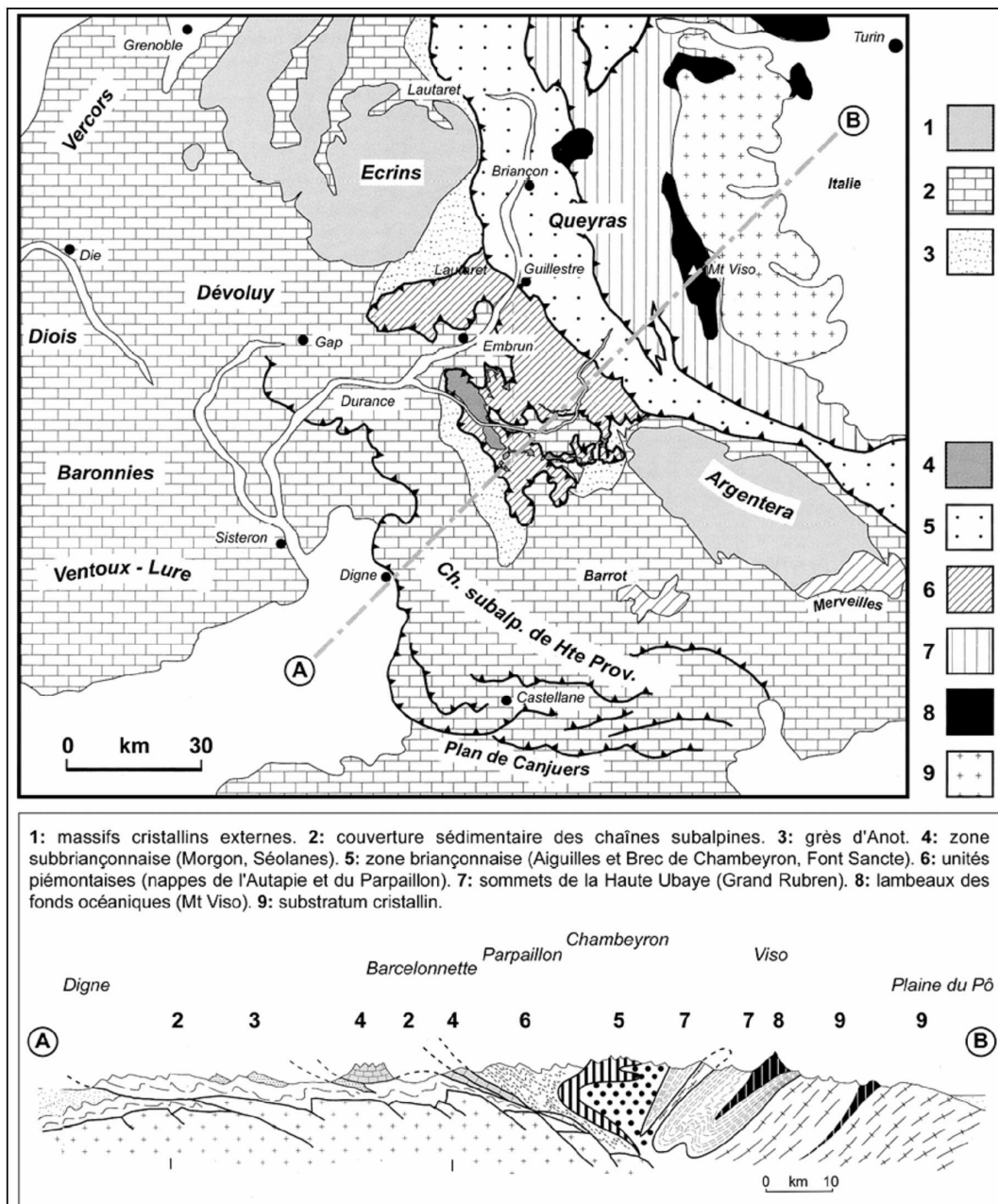


Abbildung 8: Tektonische Übersicht des Gebietes (REMAITRE 2006, 69 nach EVIN 1997)

Die allochthonen Schichten des Flyschs, die aus drei verschiedenen Gesteinsschichten bestehen sind, wie die Bezeichnung bereits aussagt nicht vor Ort entstanden, sondern wurden im Zuge der Gebirgsbildung nach Westen verschoben. Sie wurden damit über die vor Ort gebildeten (autochthonen) Sedimente geschoben und bedecken diese flächig. Durch die Wölbung dieser Schicht und die erosive Bildung des Tals wurden diese wieder freigelegt und treten nun in den tieferen Gebieten des Tals wieder an die Oberfläche.

Die geologische Konstellation im Bereich von Barcelonnette kann der Abbildung 9 entnommen werden. Die Talbereiche bis in einer Höhe von rund 1.800 m an der südexponierten Talseite und die Hänge der nordexponierten Talseite bis weit über 2.000 m sind tektonisch als autochthone Sedimente des Mesozoikums anzusprechen und aus sogenannten schwarzen Mergeln (Terres Noires, Oxfordmergel) aufgebaut.

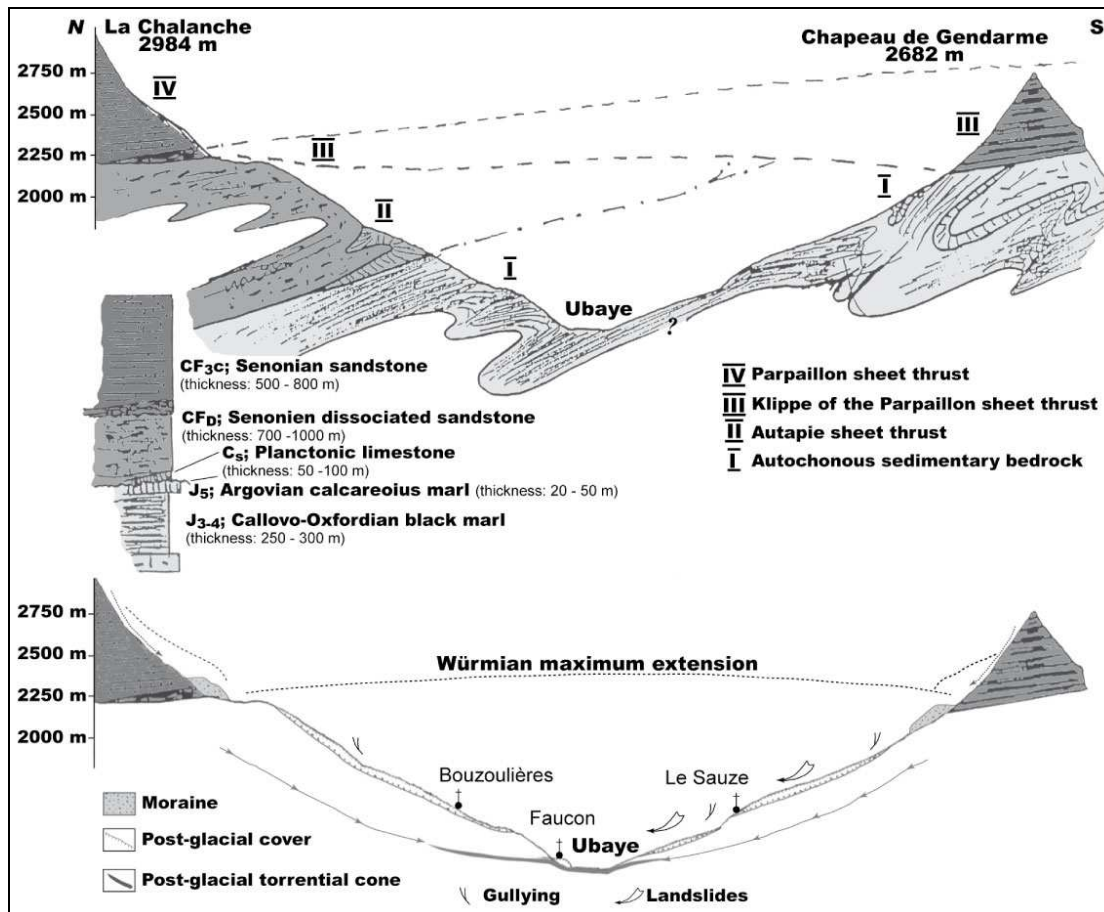


Abbildung 9: Geologischer Schnitt (OMIV 2009a)

Auf der südexponierten Talseite wird diese Einheit von zwei unterschiedlichen Sandsteinschichten des Flyschs überlagert. Die Schichtgrenze der beiden Flyschpakete tritt meist als Geländeknick zu Tage, wobei die obere Schicht die steilen, kaum bewachsenen Gipfelgrate bildet. Die untere Schicht ist wie die schwarzen Mergel meist mit

Moränenmaterial überlagert und ist generell flacher. Die beiden Sandsteinschichten entstammen unterschiedlichen Deckschichten (Parpaillon und Autapie) und wurden zeitlich getrennt überschoben.

An der nordexponierten Seite, deren Gipfel generell niedriger sind als die der gegenüberliegenden Seite, stellt sich der Aufbau etwas anders dar. Hier tritt innerhalb der Mergel und an der Grenze zum überlagernden Flysch stellenweise Kalkstein an die Oberfläche und bildet eine zweite felsige Stufe. Außerdem ist der überlagernde Sandstein nur in einer geringeren Mächtigkeit vorhanden. Ebenso wie auf der südexponierten Talseite ist auch hier ein Großteil des Gebietes mit mehreren Metern Moränenmaterial bedeckt (REMAITRE 2006, 65-71).

Die Geomorphologie des Gebietes ist neben der Geologie vor allem von der quartären Entwicklung geprägt. So wurde das Tal bis zur letzten großen Vergletscherung im ausgehenden Würm stark überprägt und eingetieft. Entsprechend ist der Grossteil der Hänge mit Moränenschutt bedeckt und es gibt einen breiten aufgeschotterten Talboden im Bereich von Barcelonnette.

Die vorherrschenden Prozesse, die das Landschaftsbild prägen sind die teilweise starke linienhafte Erosion und flächenhafte Rutschungen und Fließungen.

Ein wesentlicher Grund für die große Aktivität sind die schwarzen Mergel. Diese Schichten wirken zum einen wasserstauend und zum anderen sind sie nach wenigen Jahren an der Oberfläche stark verwittert und verlieren ihre Standfestigkeit.

So kann es entlang von Störungen zum Eindringen von Wasser kommen, wodurch sich die Stabilität verringert und ein Abrutschen ermöglicht wird. Auch die großflächige Auflösung des Verbandes und der Übergang in eine fließende Bewegung, wie bei den beiden großen Rutschungen La Valette und Super-Sauze ist möglich. Aber auch die oberflächliche Verwitterung führt zu markanten und flächenhaft ausladenden Prozessen wie der Gully und Badlandbildung.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Mur- und Wildbachaktivität der steilen Seitenbäche. Gemeinsam mit dem Material der Badlands, in die sich die Bäche teilweise tief eingegraben haben werden große Sedimentmengen aus den Flysch und Moränengebieten ins Tal transportiert und haben zur Aufschüttung von Mur- und Schwemmfächern geführt. Die angrenzenden Gemeinden waren hiervon immer wieder betroffen und es kam zu erheblichen Schäden (REMAITRE 2006, 78).

5.4. Historische Entwicklung

Die Anlage der Stadt Barcelonnette in ihrem markanten Raster stammt aus dem Mittelalter, zwischen 1190-1231 (BARCELONNETTE 2009). Allerdings dürfte die Region schon lange zuvor besiedelt gewesen sein, da es auf dem Schwemmfächer des Faucon archäologische Funde menschlicher Aktivität während der Römerzeit gibt (BALLANDRAS 1997 in FLEZ und LAHOUSSE 2004).

Zur Mitte des 19. Jahrhunderts waren große Teile des Gebietes abgeholzt und wurden intensiv genutzt. Die starke Erosion und zahlreiche Murgänge wurden als Problem gesehen und es begannen umfassende korrektive Eingriffe in den Einzugsgebieten.

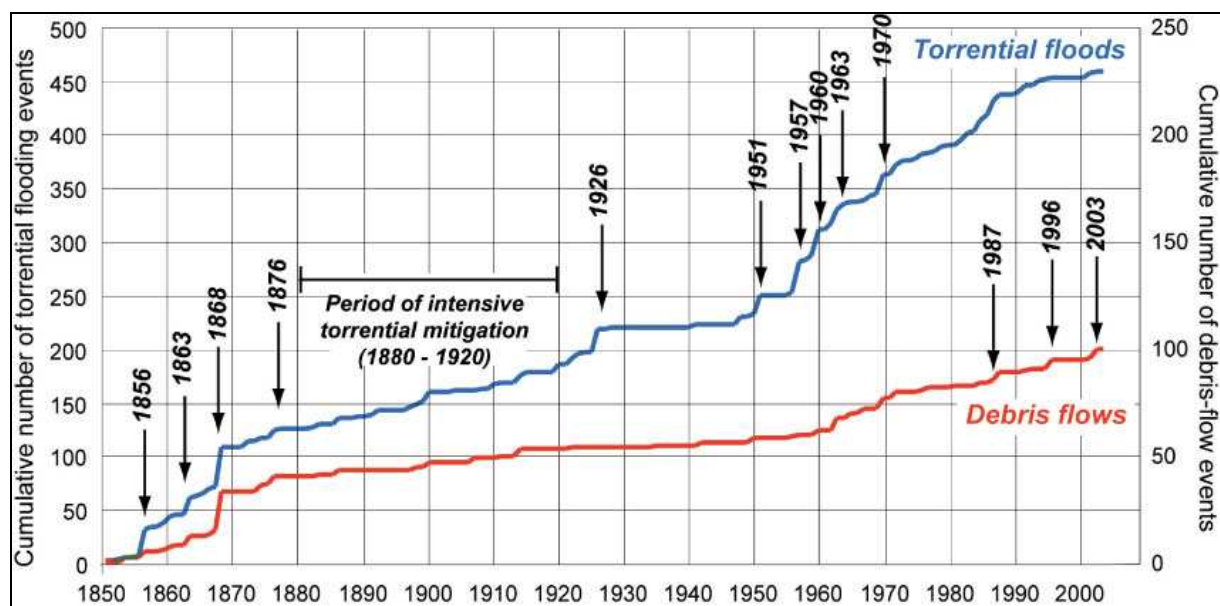


Abbildung 10: Kumulierte Murereignisse und in der Region Barcelonnette 1850-2004 (OMIV 2009b)

Wie bei REMAITRE (2006, 79) gezeigt, kam es vor allem zwischen 1860 und 1870 in dieser Region (umfasst einige zusätzliche Einzugsgebiete im Vergleich zur vorliegenden Arbeit) zu einer Vielzahl an Murereignissen und Hochwässern (siehe Abbildung 10). Daraufhin begannen, wie bei FLEZ und LAHOUSSE (2003, 111) für den Riou Bourdoux beschrieben, die Arbeiten im Einzugsgebiet. In diesem wurden zwischen 1875 und 1892 1.100 ha (rund 50% des Einzugsgebietes) aufgeforstet, die Badlands in den Mergeln stabilisiert und mehr als 1.000 kleine Steindämme in den oberen Bereichen errichtet. Erst danach erfolgte die Stabilisierung der Sohle des Hauptgerinnes mit zahlreichen meterhohen Dämmen (siehe Abbildung 11). Die Installierung von Dämmen zur Stabilisierung und Anhebung der Sohle, um ein Eintiefen bzw. Unterschneiden der Seitenhänge zu vermeiden wurde ebenso im Faucon, Bourget und Sanieres durchgeführt.

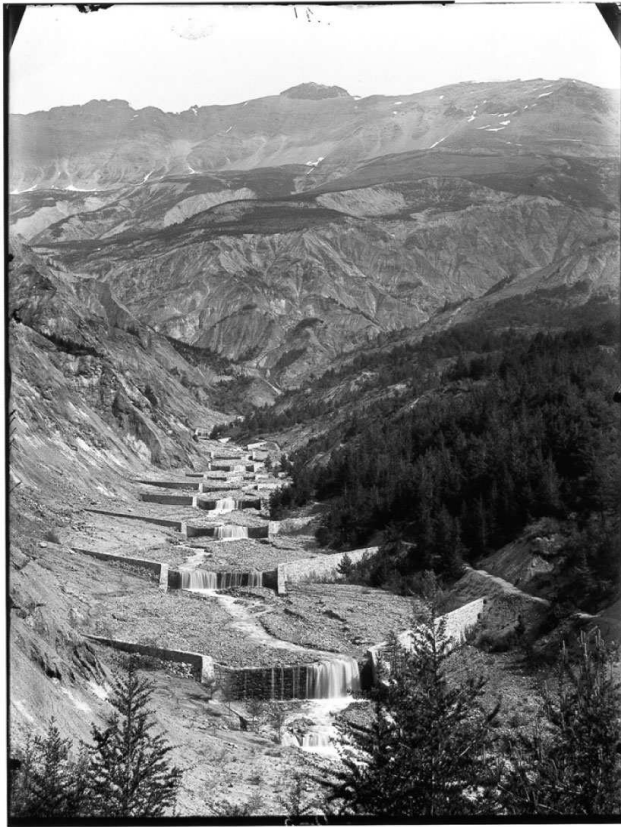


Abbildung 11: Check dams im Riou-Bourdoux um 1905 (OMIV 2009c)

Auch heute noch werden immer wieder Dämme gebaut bzw. saniert und erhalten. Nichtsdestotrotz treten nach einer Periode mit geringerer Aktivität wieder häufiger und regelmäßig Murereignisse auf, die eine Gefahr für den Menschen darstellen und zu beträchtlichen Schäden führen können. Vor allem der Riou-Bourdoux mit 27, Sanieres mit 18, Faucon mit 14 und Bourget mit 6 Ereignissen weisen während dieser 154 Jahre eine hohe Aktivität auf. Dabei finden sich rund 90% der Ereignisse auf der südexponierten Talseite und nur 10% in den Einzugsgebieten der nordexponierten Seite (REMAITRE et al. 2005). Dafür wird zum einen die Lage der Quellen zwischen den Mergeln und den darüber liegenden Schichten und zum Andern die generell größere Steilheit der Hänge und Gerinne der südexponierten Talseite angeführt.

6 Kartierungsergebnisse

Durch die Kartierung der fünf Zeitscheiben konnten in Summe 188 Murereignisse identifiziert werden. Bei rund 2/3 der Ereignisse konnte auch das Ablagerungsgebiet kartiert werden. Das Startgebiet war in den meisten Fällen nicht eindeutig erkennbar, weshalb lediglich acht kartiert werden konnten. Aufgrund der Probleme bei der Kartierung und der geringen Anzahl werden diese in der weiteren Bearbeitung und Analyse nicht mehr berücksichtigt.

6.1. Anzahl und räumliche Lage

Mit Ausnahme der beiden kleinen Einzugsgebiete La Valette und Ribes, die auf einer relativ geringen Höhe liegen und nicht den Hauptkamm erreichen, wurden in allen Einzugsgebieten Murereignisse gefunden.

Die identifizierten Murstrukturen befinden sich im Wesentlichen in den höchst gelegenen Bereichen des Untersuchungsgebietes. Sie finden sich in Felsrinnen und Schutthalden unterhalb von Felswänden. In bewachsenen Gebieten, bzw. innerhalb größerer Gerinne konnten im wesentlichen keine Murstrukturen gefunden werden. Auch Ablagerungsgebiete im Talbereich oder entlang der Gerinne konnten nicht ausgemacht werden.

Die Ablagerungsgebiete der identifizierten Muren befinden sich im direkten Anschluss an die Murkanäle. Sie liegen dabei zumeist auf den Schuttfächern und Halden oder an deren unteren Enden. Nur vereinzelt befinden sich die Ablagerungsgebiete außerhalb der aktiven Bereiche in vormals bewachsenem Gebiet.

In Abbildung 12 ist die Lage und Verteilung der Murereignisse im Untersuchungsgebiet dargestellt. Tabelle 7 bietet ebenfalls einen Überblick über die Verteilung.

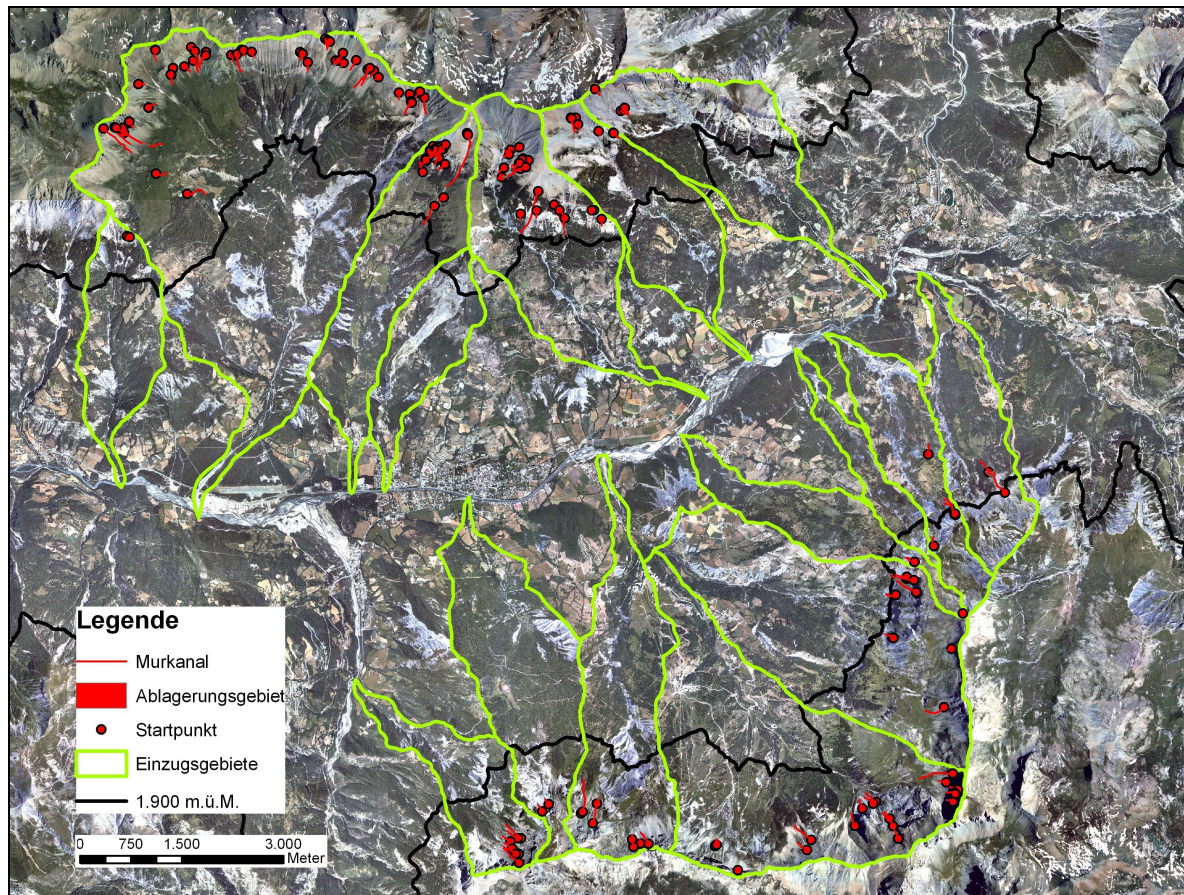


Abbildung 12: Übersicht der Lage der Murereignisse

Tabelle 7: Verteilung der Murereignisse und Ablagerungsgebiete in unterschiedlichen Flusseinzugsgebieten

	Fläche [km]	Muren	Muren/km ²	Ablagerungsgebiete	Ablagerungsgebiete/km ²
südexponierte Talseite		127	2,88	74	1,68
Berarde	3,05	2	0,66	2	0,66
Riou-Bourdoux	18,80	54	2,87	37	1,97
St-Pons	4,78	37	7,74	19	3,97
La Valette	2,50	0	0,00	0	0,00
Faucon	6,00	22	3,67	10	1,67
Bourget	4,04	8	1,98	3	0,74
Sanieres	4,88	4	0,82	3	0,61
nordexponierte Talseite		61	1,37	44	0,99
Riou-Chanal	2,79	7	2,51	3	1,08
Gaudeissart	5,54	2	0,36	2	0,36
Sauze	5,55	9	1,62	9	1,62
Enchastrayes	10,86	19	1,75	11	1,01
Bourre	9,44	11	1,17	7	0,74
Bramafan	2,55	3	1,18	2	0,78
Ribes	1,30	0	0,00	0	0,00
Poche	3,10	7	2,26	7	2,26
Frache	3,54	3	0,85	3	0,85

Der erste auffällige Punkt ist die große Häufigkeit von Murereignissen an der südexponierten Seite des Tals. An diesen Hängen waren doppelt so viele Muren erkennbar wie an der nordexponierten Seite. Auch wenn man die Fläche der Einzugsgebiete berücksichtigt, bleibt dieses Bild erhalten. Die Einzugsgebiete bedeckten an beiden Talseiten eine Fläche von rund 44 km², die Anzahl der identifizierten Muren ist also an der südexponierten Seite mit rund 2,9 Muren/km² doppelt so hoch wie an der gegenüberliegenden.

Betrachtet man die einzelnen Einzugsgebiete, so sticht vor allem jenes des Riou-Bourdoux, in dem sich 30% aller Muren befinden heraus. Aber auch im St-Pons, Faucon und Enchastrayes sind viele Muren zu finden. In Relation zur Fläche sind es vor allem St. Pons, aber auch Faucon, Riou-Bourdoux und Bourget die auf der südexponierten Seite eine hohe Muredichte aufweisen. Auf der nordexponierten Seite liegen die Werte generell niedriger, die beiden kleinen Einzugsgebiete Riou-Chanal und Poche heben sich aber leicht ab.

Die Verteilung der Ablagerungsgebiete entspricht im Wesentlichen jener der Muren. In der südexponierte Talseite konnten deutlich mehr Gebiete identifiziert werden, wobei das Verhältnis zwischen Murereignissen und zugehöriger Ablagerungsfläche mit rund 3:2 in allen Teilgebieten recht stabil ist.

Die kartierten Murereignisse haben ihren Anriss in einer Höhe zwischen 1.687 m und 2.829 m. Der Großteil der Muren streut aber um den Mittelwert (2.370 m) und den Median (2.385 m). Wie in Abbildung 13 zu sehen ist, häufen sich die Anrisse vor allem in einer Höhenlage von rund 2.200 bis 2.600 m. In diesem Bereich von 400 Höhenmetern starten in Summe rund 68% der gesamten kartierten Muren. Aber auch im Bereich von 1.900 bis 2.200 m erfolgen mit rund 19% der Muranrisse noch häufig Ereignisse.

Die Verteilung der Muranrisse folgt dabei nicht jener der generellen Höhenverteilung im Einzugsgebiet. Diese weist ihr Maximum im Bereich zwischen 1.600 und 1.700 m auf. In den Bereichen mit Muranrissen (also ab 1.900 m) liegen noch rund 45% der Gesamtfläche. Der Bereich der häufigen Muranrisse (2.200 bis 2.600 m), der 68% der Muren aufweist, verteilt sich über lediglich 19% der Einzugsgebietsfläche.

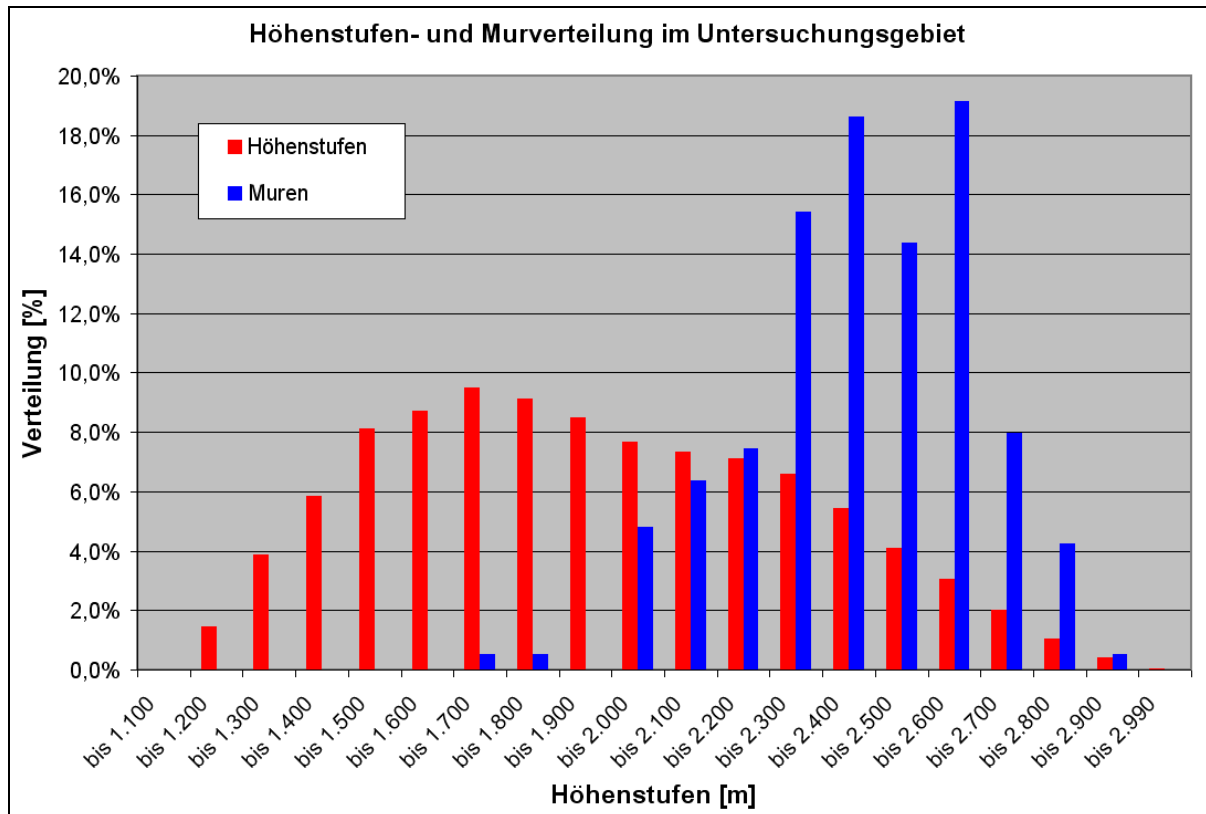


Abbildung 13: Verteilung der Einzugsgebietsflächen und der Murereignisse in Bezug auf die Höhenlage

Die Verteilung zwischen der nord- und der südexponierten Talseite unterscheidet sich dabei in den Höhenstufen leicht. Die südexponierte Talseite weist eine gleichmäßigere Verteilung mit höheren Anteilen in den tief gelegenen Klassen als auch in den höheren Gebieten auf. Die hohen Klassen sind allerdings teilweise durch die höheren Gipfel bedingt. An der nordexponierten Talseite gibt es eine Konzentration der Häufigkeiten zwischen 1.400 und 1.900 m. Die Startgebiete der Muren liegen dementsprechend, wie in Abbildung 14 zu erkennen ist, an der nordexponierten Seite tiefer und häufen sich ab 1.900 m Höhe. Bis rund 2.200 m beträgt ihr Anteil mehr als 50% der Gesamtzahl der entsprechenden Höhenstufe. Bis 2.600 m ist ihr Auftreten an dieser Talseite auch relativ gleichmäßig. Darüber tritt nur mehr ein Ereignis auf, wobei auch die Fläche an dieser Talseite nur mehr 30 ha beträgt.

An der südexponierten Seite kommen die Muren erst ab 2.200 m häufig vor und erreichen ihr Maximum zwischen 2.500 und 2.600 m Höhe. Ab 2.600 m Höhe sind 23 von 24 Ereignissen auf der südexponierten Talseite zu finden.

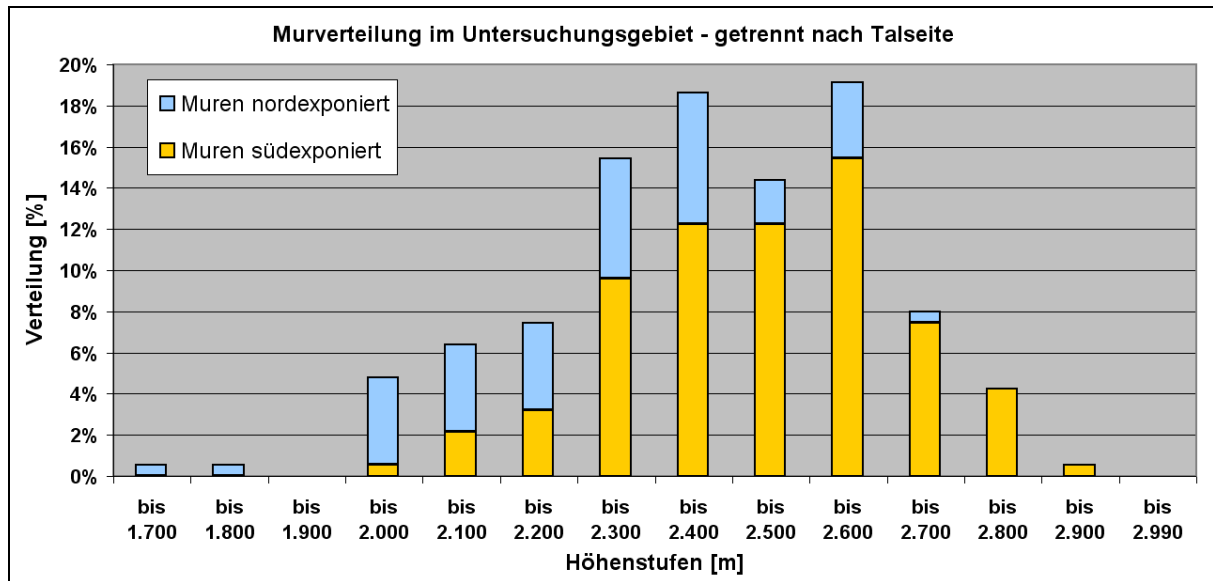


Abbildung 14: Verteilung der Murereignisse in Bezug auf die Höhenlage, getrennt nach der Talseite

6.2. Geometrische Eigenschaften

Der kürzeste erfasste Murkanal hat eine Länge von 29 m. Es wurden generell sehr viele kleine Strukturen bis ca. 150 m identifiziert. 35% der Muren liegen unter 100 m und 63% unter 150 m. Entsprechend liegt der Median auch bei 124 m. Bis rund 350 m Länge wurden auch noch zahlreiche Strukturen identifiziert. Darüber hinaus wurden nur 10 Strukturen kartiert (~ 6%), wobei die Längste 910 m beträgt.

Die Ablagerungsgebiete weisen eine Größe von 23 bis 6.368 m² auf. Rund 25% der Gebiete weisen eine Größe von unter 100 m² auf. Weitere 25% liegen im Bereich bis 250 m², dem Medianwert der Verteilung. Die Durchschnittsfläche liegt durch die asymmetrische Verteilung mit einigen sehr großen Flächen bei rund 520 m². 13 der 118 Ablagerungsgebiete wurden mit einer Größe von über 1.000 m² kartiert.

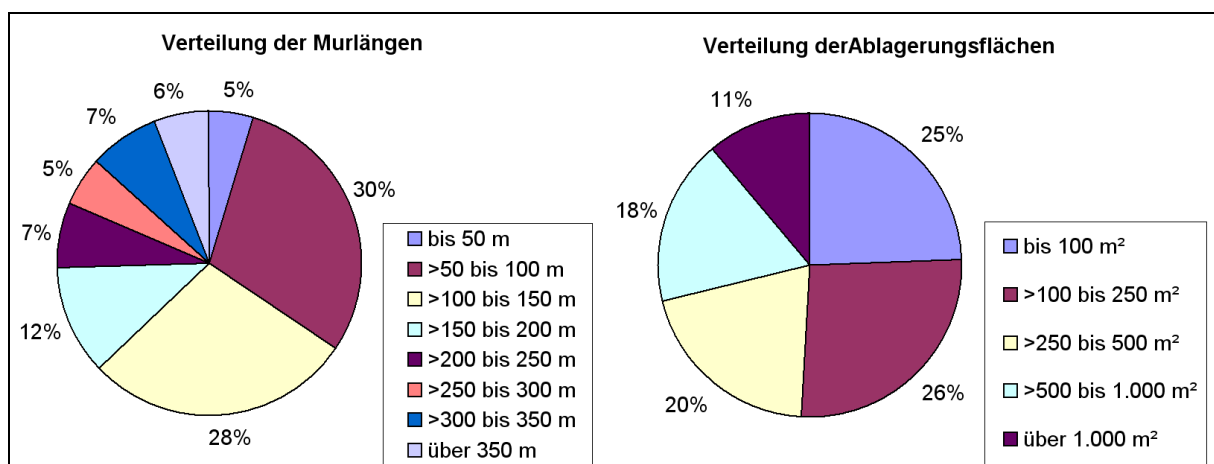


Abbildung 15: Verteilung der Murlängen und Ablagerungsflächengröße

In Abbildung 16 ist die Verteilung der Hangneigungen im Untersuchungsgebiet und der Muren dargestellt. Da sich mit Ausnahme von zwei Muranrissen alle restlichen 186 kartierten Ereignisse über 1.900 m Höhe liegen, wird diese Verteilung separat aufgeführt. Die Gesamtfläche reduziert sich dadurch auf etwas weniger als die Hälfte. Auch die Verteilung verändert sich dadurch. So gewinnen die Klassen ab 25° Neigung an Bedeutung, während jene darunter geringer repräsentiert sind.

Die Verteilung der Startbereiche, der durchschnittlichen Murkanalneigung und der Endbereiche folgt einer logischen Ordnung. Die Startpixel liegen vor allem im Bereich von 30 bis 45°. In diesen drei Klassen liegen 75% der Werte. Die Murkanäle sind in ihrer Verteilung hin zu den geringer geneigten Klassen verschoben. 38% der Kanäle weisen im Durchschnitt Werte zwischen 30 und 35° auf, wobei generell zwischen 20 und 40° fast 90% der Werte zu finden sind. Die Endpixel sind erwartungsgemäß die flachsten Bereiche der Muren. Die Häufung liegt hierbei zwischen 20 und 35°. Entsprechend liegt der Mittelwert der Startbereiche bei 36°, während jener der Endbereiche bei 28° liegt.

Die beobachtete Verteilung der Muren ist damit im Vergleich mit der generellen Flächenverteilung deutlich nach oben verschoben. Die Muren treten in den flächenmäßig geringer, aber deutlich steileren Bereichen übermäßig stark auf, während sie in den flachen Gebieten nicht zu finden sind. In den sehr seltenen Gebieten mit mehr als 55° Neigung wurden ebenfalls keine Muren bzw. Startgebiete identifiziert.

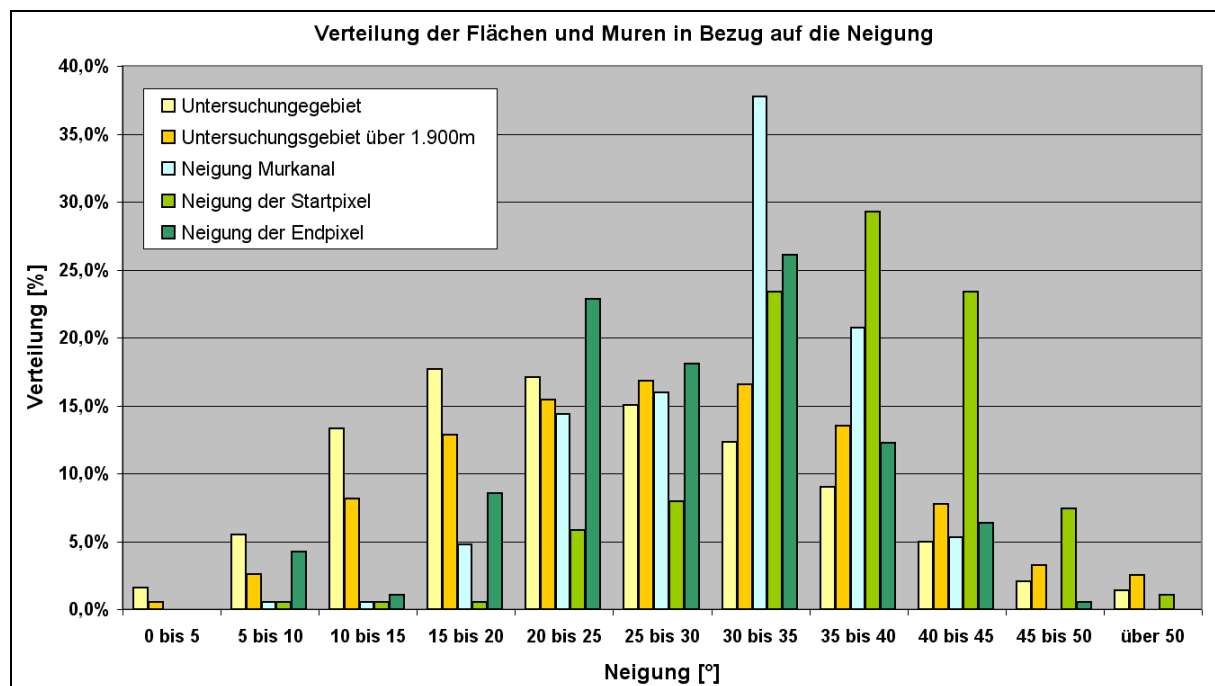


Abbildung 16: Verteilung der Einzugsgebietsflächen und der Murereignisse in Bezug auf die Hangneigung

Die hydrologischen Einzugsgebiete der Muren liegen zwischen 200 und 191.800 m². Beide Werte stellen aber Extremwerte dar. Der Wert von 200 m² ist aufgrund der Abfrage und der moving window Routine bei der Auflösung des DGM's von 10 m der kleinste mögliche Wert. Er kommt im Datensatz insgesamt zwei mal vor. Unter 1.000 m² liegen 28 Werte, also fast 15%. Der Durchschnitt der Einzugsgebietsgröße liegt bei 14.800 m², während der Median nur bei 6.900 m² liegt. In Abbildung 17 ist die Verteilung der Einzugsgebietsgrößen dargestellt.

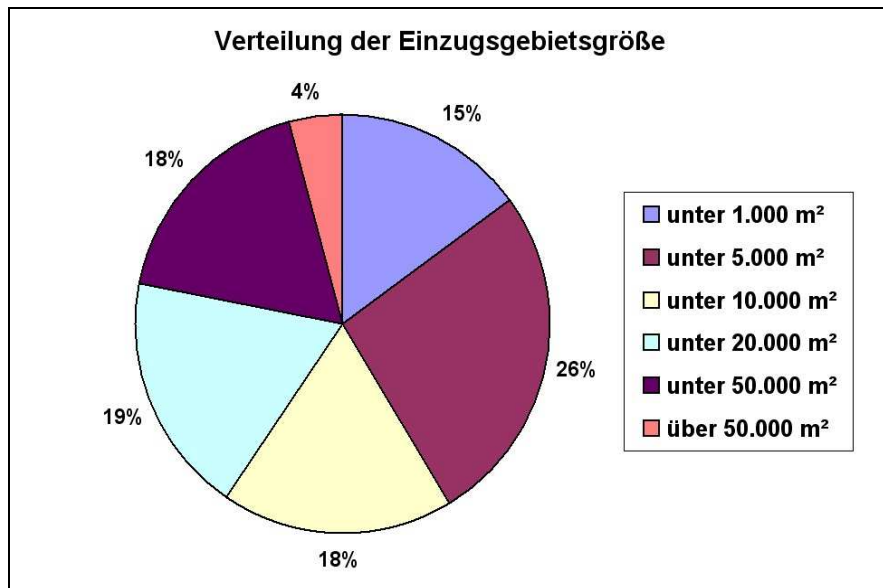


Abbildung 17: Verteilung der Einzugsgebietsgrößen der Murereignisse

Korrelation der Parameter

Nach der generellen Beschreibung der Parameter soll nun untersucht werden, ob diese zusammenhängen oder unabhängig voneinander betrachtet werden müssen. Zu diesem Zweck wird eine Korrelationsanalyse zwischen den einzelnen Parametern durchgeführt.

Der Normalverteilungstest nach Kolmogorov-Smirnov ergab, dass nur die Höhenlage und die Neigung des Endpixels eine Normalverteilung aufweisen (Signifikanz über 0,5). Alle anderen Variablen liegen deutlich darunter bzw. mehrfach unter 0,0005. Daher wird der Test nach Spearman verwendet.

In der folgenden Tabelle sind die Ergebnisse dargestellt. Wie zu erwarten war, gibt es im Datensatz eine Vielzahl an signifikant korrelierenden Variablen. Die Stärke des Zusammenhangs schwankt allerdings erheblich.

Tabelle 8: Korrelationsmatrix der einzelnen Murparameter für das gesamte Untersuchungsgebiet

		Länge	Höhe des Startpunktes	Höhe des Endpunktes	Höhen-differenz	Neigung Murkanal	Fläche Ablagerungen	Einzugs-gebiet	Neigung Startpixel	Neigung Endpixel
Länge	Cor. Coefficient	1,000	-,355(**)	-0,101	,887(**)	-,434(**)	,584(**)	,143(*)	-0,138	-,481(**)
	Sig. (2-tailed)		0,000	0,167	0,000	0,000	0,000	0,050	0,059	0,000
	N	188	188	188	188	188	118	188	188	188
Höhe des Startpunktes	Cor. Coefficient	-,355(**)	1,000	,940(**)	-,178(*)	,399(**)	-,266(**)	-,246(**)	,278(**)	,510(**)
	Sig. (2-tailed)	0,000		0,000	0,015	0,000	0,004	0,001	0,000	0,000
	N	188	188	188	188	188	118	188	188	188
Höhe des Endpunktes	Cor. Coefficient	-0,101	,940(**)	1,000	0,085	,351(**)	-0,140	-,244(**)	,298(**)	,428(**)
	Sig. (2-tailed)	0,167	0,000		0,246	0,000	0,131	0,001	0,000	0,000
	N	188	188	188	188	188	118	188	188	188
Höhen-differenz	Cor. Coefficient	,887(**)	-,178(*)	0,085	1,000	-0,035	,506(**)	-0,007	0,141	-,178(*)
	Sig. (2-tailed)	0,000	0,015	0,246		0,632	0,000	0,928	0,054	0,014
	N	188	188	188	188	188	118	188	188	188
Neigung Murkanal	Cor. Coefficient	-,434(**)	,399(**)	,351(**)	-0,035	1,000	-,369(**)	-,358(**)	,603(**)	,742(**)
	Sig. (2-tailed)	0,000	0,000	0,000	0,632		0,000	0,000	0,000	0,000
	N	188	188	188	188	188	118	188	188	188
Fläche Ablagerungen	Cor. Coefficient	,584(**)	-,266(**)	-0,140	,506(**)	-,369(**)	1,000	,282(**)	-,230(*)	-,426(**)
	Sig. (2-tailed)	0,000	0,004	0,131	0,000	0,000		0,002	0,012	0,000
	N	118	118	118	118	118	118	118	118	118
Einzugs-gebiet	Cor. Coefficient	,143(*)	-,246(**)	-,244(**)	-0,007	-,358(**)	,282(**)	1,000	-,324(**)	-,252(**)
	Sig. (2-tailed)	0,050	0,001	0,001	0,928	0,000	0,002		0,000	0,000
	N	188	188	188	188	188	118	188	188	188
Neigung Startpixel	Cor. Coefficient	-0,138	,278(**)	,298(**)	0,141	,603(**)	-,230(*)	-,324(**)	1,000	,401(**)
	Sig. (2-tailed)	0,059	0,000	0,000	0,054	0,000	0,012	0,000		0,000
	N	188	188	188	188	188	118	188	188	188
Neigung Endpixel	Cor. Coefficient	-,481(**)	,510(**)	,428(**)	-,178(*)	,742(**)	-,426(**)	-,252(**)	,401(**)	1,000
	Sig. (2-tailed)	0,000	0,000	0,000	0,014	0,000	0,000	0,000	0,000	
	N	188	188	188	188	188	118	188	188	188

** Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

* Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

Die Länge korreliert sehr stark mit der Höhendifferenz. Die Neigung hat hier allerdings ebenfalls einen Einfluss, der eine negative Richtung aufweist. Aber auch mit der Fläche der Ablagerungen gibt es eine Korrelation die als mittel bis stark einzuschätzen ist.

Die Höhenlage der Start- und Endpunkte korreliert auch sehr stark miteinander. Ansonsten sind zwar signifikante, aber in der Stärke des Zusammenhangs eher mittlere Korrelationen zu finden. Die Fläche der Ablagerungsgebiete korreliert nach der Länge ebenfalls mit der Höhendifferenz, während sich mit dem Einzugsgebiet nur ein Wert von unter 0,3 ergibt. Erwähnenswert erscheinen noch die negativen Korrelationskoeffizienten zwischen den Neigungen und der Ablagerungsfläche bzw. dem Einzugsgebiet.

Generell werden 25 der insgesamt 36 Wertkorrelationen als hoch signifikant ausgewiesen, was auf die Abhängigkeiten und Zusammenhänge innerhalb des Datensatzes bzw. der Prozessvariablen hinweist. Die externen Einflüsse und Beschränkungen sind hier sicherlich von großer Bedeutung.

6.3. Verteilung und Unterschiede im Untersuchungsgebiet

Vergleicht und untergliedert man die Murereignisse nach ihrer Lage im Untersuchungsgebiet (Nord- und südexponierte Standorte) ergibt sich im Regelfall ein leicht verändertes Bild.

In der nachfolgenden Tabelle sind die unterschiedlichen Variablen, untergliedert nach der Lage im Untersuchungsgebiet aufgelistet.

Tabelle 9: Übersicht der Murparameter, gegliedert nach Talseite, Anzahl der Muren/Ablagerungsgebiete im jeweiligen Gebiet in Klammer angeführt

Gebiet	Länge [m]	Fläche [m²]	Neigung [°]			Einzugsgebiet [m²]	Höhendifferenz [m]
			Startpixel	Murkanal	Endpixel		
Nordexponiert (61/44 Fälle)	192	794	35,4	28,5	24,0	17.500	99
Südexponiert (127/74 Fälle)	150	359	36,7	32,0	30,1	13.500	91

Wie in der Tabelle zu erkennen ist, gibt es deutliche Unterschiede zwischen den beiden Talseiten. Vor allem bei der Länge und der Fläche stechen diese ins Auge. Aber auch die Neigungswerte der Muren (in allen drei Bereichen) weisen kontinuierliche Unterschiede auf. Vor allem beim Endpixel des Murkanals ist die Differenz zwischen den beiden Talseiten sehr markant.

Nun wird der Datensatz nach der Geologie unterteilt und untersucht, ob bzw. wie sich diese Unterschiede verändern.

Tabelle 10: Übersicht der Murparameter, gegliedert nach Geologie, Anzahl der Muren/Ablagerungsgebiete im jeweiligen Gebiet in Klammer angeführt

Gebiet	Länge [m]	Fläche [m²]	Neigung [°]			Einzugsgebiet [m²]	Höhendifferenz [m]
			Startpixel	Murkanal	Endpixel		
Kalk (29/20 Fälle)	191	1170	33,6	28,1	24,7	24.600	98
Flysch (153/94 Fälle)	159	393	37,3	31,9	29,1	12.200	94
sonstiges (6/4 Fälle)	162	279	24,0	16,2	19,0	34.000	45

In Tabelle 10 sind nun die entsprechenden Werte für die geologische Untergliederung zu finden. Das Bild der vorangegangenen Klassifikation bleibt in den wesentlichen Zügen erhalten. Die Muren im Kalk (alle in der nordexponierten Talseite) sind deutlich länger, haben

größere Ablagerungsflächen und Einzugsgebiete, sind aber generell flacher. Allerdings sind nun deutlich weniger Fälle in der Klasse zusammengefasst. Lediglich 29 Muren liegen im Bereich der Kalkschichten, das sind etwa 50% der Muren dieser Talseite. Im Vergleich mit der Talseitenbetrachtung haben sich aber nur drei Parameter merklich verändert. Einer davon ist die Neigung der Startpixel des Murkanals. Dieser weist nun ebenfalls, wie die beiden anderen Neigungsparameter, einen Unterschied von einigen Grad zwischen den beiden Klassen auf. Die beiden anderen Werte sind die Ablagerungsfläche und die Fläche des Einzugsgebietes. Diese sind in der geologischen Untergliederung deutlich größer.

Im Flysch, dem 153 Fälle angehören, sind die Parameter Länge und Fläche geringfügig gestiegen. Ansonsten hat sich nur das durchschnittliche Einzugsgebiet geringfügig verkleinert und die Neigung der Start- und Endpixel haben sich etwas verändert. Im Flysch sind die Veränderungen nicht so markant, da lediglich rund 25% der Fälle im Vergleich zu vorangegangenen Betrachtung hinzugekommen sind. Zwischen der Expositions-betrachtung und der Klasse Kalk hingegen hat sich die Fallzahl halbiert.

Eine Überprüfung auf statistische Signifikanz der Unterschiede zwischen den Gruppen wurde mithilfe des Kruskal-Wallis-Tests bzw. des Mann-Whitney-Tests durchgeführt, da die Daten nicht als normalverteilt akzeptiert werden konnten. Folgendes Bild ergab sich bei der Überprüfung der Unterschiede:

Tabelle 11: Überprüfung der statistischen Signifikanz der Unterschiede in den Murparametern, gegliedert nach der Geologie, für alle 3 Gruppen

	Länge	Höhendifferenz	Neigung Murkanal	Fläche Ablagerungen	Einzugsgebiet	Neigung Startpixel	Neigung Endpixel
Chi-Square	4,000	5,242	24,410	3,348	1,273	17,103	18,086
df	2	2	2	2	2	2	2
Asymp. Sig.	,135	,073	,000	,188	,529	,000	,000

Tabelle 12: Überprüfung der statistischen Signifikanz der Unterschiede in den Murparametern, gegliedert nach der Geologie, nur für die Gruppen Kalk und Flysch

	Länge	Höhendifferenz	Neigung Murkanal	Fläche Ablagerungen	Einzugsgebiet	Neigung Startpixel	Neigung Endpixel
Mann-Whitney U	1703,000	1985,000	1393,000	702,000	2156,500	1497,000	1421,000
Z	-1,982	-,898	-3,173	-1,773	-,238	-2,774	-3,066
Asymp. Sig. (2-tailed)	,048	,369	,002	,076	,812	,006	,002

In der ersten Betrachtung wurden alle drei Gruppe überprüft. Das Ergebnis zeigt, dass sich die Neigungen signifikant unterscheiden. Für das Einzugsgebiet kann dies nicht gesagt werden. Die Länge, Höhendifferenz und Ablagerungsfläche unterscheiden sich zwar, aber es gibt eine erhebliche Irrtumswahrscheinlichkeit. Werden die sonstigen Fälle in der Betrachtung ignoriert, was bei einem Vergleich der beiden als sinnvoll anzusehen ist, verschiebt sich dieses Bild leicht. Die Neigungen bleiben signifikant unterschiedlich, während die Irrtumswahrscheinlichkeit bei der Ablagerungsfläche und der Murkanallänge deutlich abnimmt. Die Länge kann nun auch als signifikant angesehen werden. Die Veränderung liegt nicht an der Anwendung eines anderen Tests, da bei Anwendung des Kruskal-Wallis-Test aufgrund der verwandten Berechnungsmethode die selben Signifikanzen errechnet wurden. Interessanterweise liegt die Signifikanz bei der Prüfung der Talseiten mit Ausnahme der Neigung der Startpixel generell besser. Hier ist der Längenunterschied höchst signifikant und auch die Ablagerungsfläche unterscheidet sich mit einem Wert von 0,033 deutlich zwischen den Gruppen. Die Größe des Einzugsgebietes bleibt aber mit 0,32 nicht interpretierbar.

Nach der Analyse der Unterschiede zwischen den Klassen Kalk und Flysch soll noch betrachtet werden, ob sich die Korrelationen verändert haben, bzw. deutliche Unterschiede zwischen den Klassen auftreten. Dazu wurde wiederum der Spearman'sche Korrelationskoeffizient berechnet. In Tabelle 13 und 14 sind die Ergebnisse dargestellt.

Tabelle 13: Korrelationsmatrix der einzelnen Murparameter für die Gruppe Kalk

		Länge	Höhe des Startpunktes	Höhe des Endpunktes	Höhen-differenz	Neigung Murkanal	Fläche Ablagerungen	Einzugs-gebiet	Neigung Startpixel	Neigung Endpixel
Länge	Cor. Coefficient	1,000	-,470(*)	0,064	,900(**)	-0,312	,699(**)	0,354	-0,223	-,377(*)
	Sig. (2-tailed)		0,010	0,742	0,000	0,099	0,001	0,059	0,244	0,044
	N	29	29	29	29	29	20	29	29	29
Höhe des Startpunktes	Cor. Coefficient	-,470(*)	1,000	,810(**)	-0,224	,622(**)	-,621(**)	-,727(**)	,688(**)	,703(**)
	Sig. (2-tailed)	0,010		0,000	0,243	0,000	0,004	0,000	0,000	0,000
	N	29	29	29	29	29	20	29	29	29
Höhe des Endpunktes	Cor. Coefficient	0,064	,810(**)	1,000	0,339	,633(**)	-0,281	-,635(**)	,674(**)	,650(**)
	Sig. (2-tailed)	0,742	0,000		0,072	0,000	0,231	0,000	0,000	0,000
	N	29	29	29	29	29	20	29	29	29
Höhen-differenz	Cor. Coefficient	,900(**)	-0,224	0,339	1,000	0,090	,494(*)	0,091	0,077	-0,020
	Sig. (2-tailed)	0,000	0,243	0,072		0,643	0,027	0,640	0,690	0,916
	N	29	29	29	29	29	20	29	29	29
Neigung Murkanal	Cor. Coefficient	-0,312	,622(**)	,633(**)	0,090	1,000	-,630(**)	-,675(**)	,717(**)	,909(**)
	Sig. (2-tailed)	0,099	0,000	0,000	0,643		0,003	0,000	0,000	0,000
	N	29	29	29	29	29	20	29	29	29
Fläche Ablagerungen	Cor. Coefficient	,699(**)	-,621(**)	-0,281	,494(*)	-,630(**)	1,000	,740(**)	-,741(**)	-,741(**)
	Sig. (2-tailed)	0,001	0,004	0,231	0,027	0,003		0,000	0,000	0,000
	N	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Einzugs-gebiet	Cor. Coefficient	0,354	-,727(**)	-,635(**)	0,091	-,675(**)	,740(**)	1,000	-,758(**)	-,716(**)
	Sig. (2-tailed)	0,059	0,000	0,000	0,640	0,000	0,000		0,000	0,000
	N	29	29	29	29	29	20	29	29	29
Neigung Startpixel	Cor. Coefficient	-0,223	,688(**)	,674(**)	0,077	,717(**)	-,741(**)	-,758(**)	1,000	,754(**)
	Sig. (2-tailed)	0,244	0,000	0,000	0,690	0,000	0,000	0,000		0,000
	N	29	29	29	29	29	20	29	29	29
Neigung Endpixel	Cor. Coefficient	-,377(*)	,703(**)	,650(**)	-0,020	,909(**)	-,741(**)	-,716(**)	,754(**)	1,000
	Sig. (2-tailed)	0,044	0,000	0,000	0,916	0,000	0,000	0,000	0,000	
	N	29	29	29	29	29	20	29	29	29

* . Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

Tabelle 14: Korrelationsmatrix der einzelnen Murparameter für die Gruppe Flysch

		Länge	Höhe des Startpunktes	Höhe des Endpunktes	Höhen-differenz	Neigung Murkanal	Fläche Ablagerungen	Einzugs-gebiet	Neigung Startpixel	Neigung Endpixel
Länge	Cor. Coefficient	1,000	-,329(**)	-0,056	,907(**)	-,451(**)	,559(**)	0,132	-0,083	-,480(**)
	Sig. (2-tailed)		0,000	0,489	0,000	0,000	0,000	0,103	0,306	0,000
	N	153	153	153	153	153	94	153	153	153
Höhe des Startpunktes	Cor. Coefficient	-,329(**)	1,000	,927(**)	-,197(*)	,304(**)	-,208(*)	-,216(**)	0	,442(**)
	Sig. (2-tailed)			0,000	0,015	0,000	0,045	0,007	0,052	0,000
	N	153	153	153	153	153	94	153	153	153
Höhe des Endpunktes	Cor. Coefficient	-0,056	,927(**)	1,000	0,075	,221(**)	-0,082	-,228(**)	,179(*)	,326(**)
	Sig. (2-tailed)	0,489	0,000		0,356	0,006	0,430	0,005	0,027	0,000
	N	153	153	153	153	153	94	153	153	153
Höhen-differenz	Cor. Coefficient	,907(**)	-,197(*)	0,075	1,000	-0,088	,499(**)	0,008	0,137	-,226(**)
	Sig. (2-tailed)	0,000	0,015	0,356		0,281	0,000	0,921	0,090	0,005
	N	153	153	153	153	153	94	153	153	153
Neigung Murkanal	Cor. Coefficient	-,451(**)	,304(**)	,221(**)	-0,088	1,000	-,329(**)	-,323(**)	,508(**)	,678(**)
	Sig. (2-tailed)	0,000	0,000	0,006	0,281		0,001	0,000	0,000	0,000
	N	153	153	153	153	153	94	153	153	153
Fläche Ablagerungen	Cor. Coefficient	,559(**)	-,208(*)	-0,082	,499(**)	-,329(**)	1,000	,226(*)	0	-,371(**)
	Sig. (2-tailed)	0,000	0,045	0,430	0,000	0,001		0,029	0,234	0,000
	N	94	94	94	94	94	94	94	94	94
Einzugs-gebiet	Cor. Coefficient	0,132	-,216(**)	-,228(**)	0,008	-,323(**)	,226(*)	1,000	-,245(**)	-,176(*)
	Sig. (2-tailed)	0,103	0,007	0,005	0,921	0,000	0,029		0,002	0,029
	N	153	153	153	153	153	94	153	153	153
Neigung Startpixel	Cor. Coefficient	-0,083	0	,179(*)	0,137	,508(**)	0	-,245(**)	1,000	,271(**)
	Sig. (2-tailed)	0,306	0,052	0,027	0,090	0,000	0,234	0,002		0,001
	N	153	153	153	153	153	94	153	153	153
Neigung Endpixel	Cor. Coefficient	-,480(**)	,442(**)	,326(**)	-,226(**)	,678(**)	-,371(**)	-,176(*)	,271(**)	1,000
	Sig. (2-tailed)	0,000	0,000	0,000	0,005	0,000	0,000	0,029	0,001	
	N	153	153	153	153	153	94	153	153	153

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

* . Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

Wie bereits für den gesamten Datensatz festgestellt, korreliert die Murkanallänge sehr stark mit der Höhendifferenz. Mit der Neigung gibt es im Kalk allerdings kein signifikantes Ergebnis. Allerdings zeigt sich hier eine starke Korrelation mit der Fläche der Ablagerungen. Bei der Höhenlage zeigen sich im Kalk wiederum sehr gute Ergebnisse mit der Neigung, der Fläche und dem Einzugsgebiet, während dieser im Flysch nicht so deutlich ausgeprägt ist. Auch die Korrelation zwischen Ablagerungsfläche und Einzugsgebiet liegt im Kalk in einem sehr starken Bereich. Generell sind die Werte im Kalk deutlich höher als im Flysch. Während die Gesamtwerte in der Mitte der beiden Gruppen liegen.

7 Zeitliche Variabilität

Nachdem im vorangegangenen Abschnitt der gesamte Datensatz betrachtet worden ist, soll nun eine Untergliederung nach den einzelnen Zeitscheiben erfolgen, um die in Kapitel 1 definierten Forschungsfragen zu überprüfen.

Die Kartierung der Orthofotos ergab dabei folgende Verteilung der identifizierten Murereignisse:

Tabelle 15: Häufigkeit und Rate der Murereignisse in den unterschiedlichen Zeitscheiben

	Muren	Ablagerungsgebiete	Muren/Jahr
1974	65	42	3,6
1982	20	13	2,5
1995	19	11	1,5
2000	19	8	3,8
2004	65	45	16,3

Wenn man die Gesamtzahl betrachtet fällt auf, dass auf den Fotos von 1974 und 2004 mit 65 Muren eine sehr große Anzahl gefunden worden ist, während auf den drei Fotos zwischen diesen Zeitpunkten nur 19 bzw. 20 Muren identifiziert werden konnten. Da sich die Dauer der einzelnen Zeitscheiben deutlich unterscheidet, wurde die Gesamtzahl auf eine Rate umgerechnet. Das Bild mit Schwankungen um den Faktor drei bleibt prinzipiell erhalten, wobei aber die Scheibe von 2004 durch den kurzen Zeitraum und die große Anzahl von Muren deutlich darüber liegt (Faktor 10). Für die Ablagerungsflächen, die wie bereits im vorangegangenen Kapitel bei der Untergliederung nach Einzugsgebieten erwähnt synchron mit der Murverteilung einhergehen, zeigt sich auch hier wieder ein sehr ähnliches Bild. Es konnten in den einzelnen Zeitscheiben bei rund 2/3 der Murereignisse die zugehörigen Ablagerungsflächen identifiziert werden.

Zwischen 1974 und 1995 ist die Anzahl der Muren pro Jahr deutlich zurückgegangen. Ab diesem Tiefpunkt steigt die Anzahl bis 2000 wieder auf jenen Wert von 1974. Der Wert von 2004 mit 16,3 identifizierten Muren pro Jahr liegt deutlich über den anderen beobachteten Werten.

In einem weiteren Schritt werden die Ereignisse nun nach Talseite bzw. Geologie untergliedert. Tabelle 16 zeigt die Verteilung der Muren. Die Ereignisse außerhalb der beiden dargestellten geologischen Klassen werden hierbei nicht berücksichtigt.

Tabelle 16: Häufigkeit und Rate der Murereignisse in den unterschiedlichen Zeitscheiben, gegliedert nach Talseite und Geologie

	Muren		Muren/Jahr		in abh. der Geologie		in abh. der Geologie/Jahr	
	südex.	nordexp.	südex.	nordexp.	Flysch	Kalk	Flysch	Kalk
1974	46	19	2,6	1,1	62	2	3,4	0,1
1982	3	17	0,4	2,1	8	11	1,0	1,4
1995	12	7	0,9	0,5	12	6	0,9	0,5
2000	14	5	2,8	1,0	16	1	3,2	0,2
2004	52	13	13	3,3	55	8	13,8	2,0

Im Wesentlichen bleibt das selbe Bild erhalten, wie es sich in der Gesamtbetrachtung darstellt. Die Muren verteilen sich gleichmäßig mit rund 1/3 südlich des Ubaye-Tals und 2/3 nördlich des Tals. Eine Ausnahme ist das Jahr 1982. Wie in der Tabelle zu sehen ist, dreht sich hier das Verhältnis komplett um. Südexponiert waren lediglich drei Muren zu finden was nur 25% des nächst kleinsten Wertes bedeutet. Nordexponiert hingegen konnten 17 Muren gefunden werden. Das ist der 2. häufigste Wert und ergibt die hohe Rate von 2,1 Muren pro Jahr.

Durch die starken Zusammenhänge zwischen Talseite und Geologie ergibt sich ein sehr ähnliches Bild der beiden Untergliederungen. Im Flysch sticht das Maximum von 2004 deutlich hervor, während die Jahre 2000 und 1974 moderate Werte aufweisen. 1982 und 1995 zeigen nur eine geringe Anzahl von Muren pro Jahr. Im Kalk hingegen weisen 2004, aber mit etwas Abstand auch 1982 relativ hohe Werte auf. Die restlichen drei Zeitscheiben folgen mit ähnlich geringen Werten mit großem Abstand.

Um nicht nur die Anzahl selbst, sondern auch das Ausmaß der Ereignisse in Betracht zu ziehen wurden die Murlängen und die Größe der Ablagerungsflächen in der Analyse berücksichtigt. Die durchschnittliche Murlänge schwankt dabei zwischen 150 und 206 m in den einzelnen Zeitscheiben. Die kleinsten Werte liegen, wie in Abbildung 18 zu sehen ist am Beginn und mit 150 m am Ende der betrachteten Zeitspanne. Deutlich über den Werten der vier anderen Perioden (150- 174 m) liegt die Durchschnittslänge von 1982 mit 206 m. Dies liegt nicht an einem einzelnen Ausreißer, denn auch in der Betrachtung des Medianwertes liegt die Murlänge von 1982 deutlich über den anderen.

Für die Summe der aufgetretenen Murlängen pro Jahr bleibt weiterhin das Grundbild erhalten. Die Zeitscheibe von 2004 überragt alle anderen, während sich diese in einem begrenzten Band befinden und 1995 den Tiefpunkt darstellt.

Die durchschnittliche Fläche der Ablagerungen zeigt das selbe Bild wie jene der Murlängen. Die Unterschiede sind aber deutlich Größer ausgeprägt. Das Verhältnis zwischen der kleinsten und größten durchschnittlichen Flächengröße (2004 zu 1982) liegt bei 2,7. Dieser erhebliche Unterschied spiegelt sich auch hier im Medianwert der Zeitscheiben wider. Betrachtet man nun das Bild der von Ablagerungen betroffenen Flächen fällt auf, dass sich die Unterschiede reduziert haben. 2004 hat nach wie vor eine Ausnahmestellung, aber durch die großflächigeren Ablagerungen, vor allem von 1982, ist der Unterschied nicht mehr so massiv. 1995, aber auch 2000 weisen recht geringe Flächen aus, was auch an der vergleichsweise geringen Anzahl an identifizierten Flächen liegt.

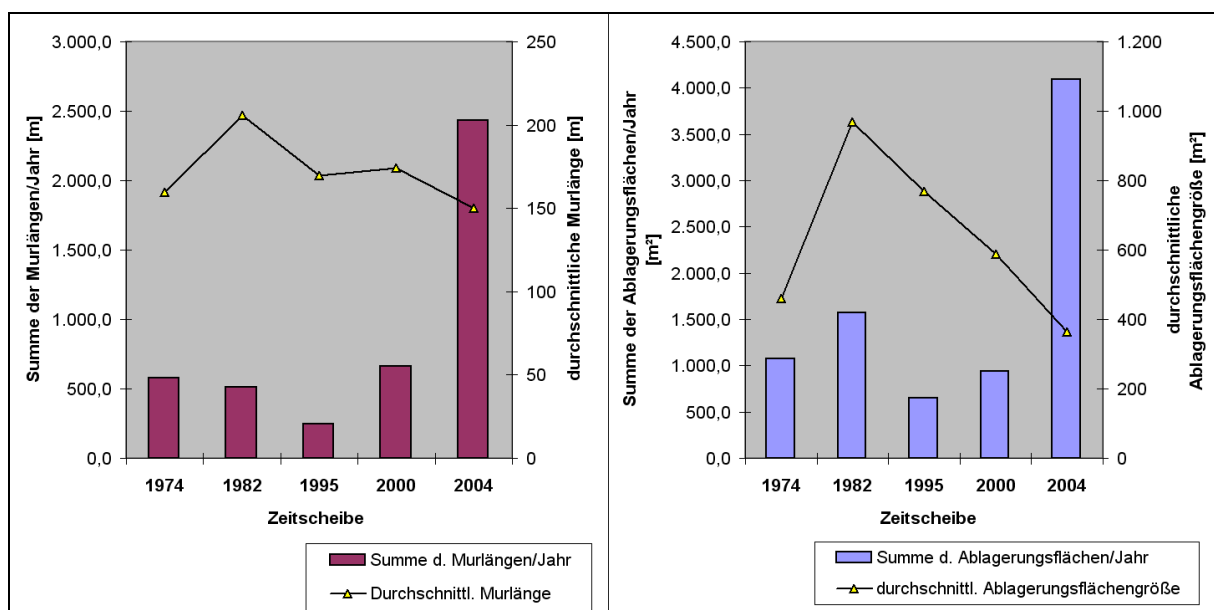


Abbildung 18: Murlänge und Ablagerungsflächengröße in den einzelnen Zeitscheiben

Die dargestellten Schwankungen wurden, wie in Abschnitt 4.3.2 erläutert, einer Prüfung auf statistische Signifikanz unterzogen. Da es sich sowohl bei den Murlängen als auch bei den Ablagerungsflächen in fast allen Zeitscheiben um keine normalverteilten Daten handelt (gem. Kolmogorov-Smirnov-Test und Shapiro-Wilk-Test) wurde der Kruskal-Wallis Test für mehrere unabhängige Stichproben herangezogen.

Das Ergebnis zeigte, dass die Unterschiede zwischen den einzelnen Zeitscheiben hoch signifikant (unter 0,05) sind. Im Fall der Murlängen lag der Wert bei 0,007, für die Ablagerungsflächen bei 0,008. Allerdings bewegt sich der Datensatz an der unteren Grenze der Aussagekraft, da im Normalfall rund 20 Fälle pro Klasse vorhanden sein sollten.

Wie bereits zuvor generell und in Kapitel 6.3 ohne zeitliche Untergliederung, sollen nun die ermittelten Parameter der Ereignisse für die einzelnen Zeitscheiben, getrennt nach Talseite bzw. Geologie betrachtet werden. Zu berücksichtigen ist aber, dass die Fallzahlen zum Teil sehr gering sind.

Zugrunde gelegt wird dabei wieder die geologische Klassifikation Kalk, Flysch, Sonstiges gemäß Kapitel 4.2.3. Für die Neigung wird aber nur mehr jene des Startpixels herangezogen. Zwar war diese im Vergleich der Talseiten nicht signifikant, ist aber der interessanteste Wert, da er Rückschlüsse auf die Stärke des auslösenden Ereignisses zulassen könnte.

Tabelle 17: Übersicht der Murparameter der einzelnen Zeitscheiben, gegliedert nach Talseite, Anzahl der Muren/Ablagerungsgebiete im jeweiligen Gebiet in Klammer angeführt

	Gebiet	Länge [m]	Fläche [m ²]	Neigung [°]	Einzugsgebiet [m ²]	Höhendifferenz [m]
1974	Nordexponiert (19/16)	188	610	29,6	19.400	99
	Südexponiert (46/26)	148	370	31,6	9.600	89
1982	Nordexponiert (17/11)	200	1017	26,9	19.800	102
	Südexponiert (3/1)	238	1405	26,1	9.800	129
1995	Nordexponiert (7/5)	233	965	31,2	17.800	129
	Südexponiert (12/6)	133	605	31,9	14.200	84
2000	Nordexponiert (5/1)	155	1818	24,9	11.600	67
	Südexponiert (14/7)	181	411	27,6	20.600	93
2004	Nordexponiert (13/11)	178	668	28,9	13.900	90
	Südexponiert (52/34)	143	265	33,8	15.100	91

Das dargestellte Bild mit längeren Muren und größeren Ablagerungsflächen an der nordexponierten Talseite lässt sich nicht in allen Zeitscheiben finden (siehe Tabelle 17). Bei den Ablagerungsflächen handelt es sich 1982 allerdings nur um eine einzelne Fläche am südexponierten Hang, was bei der Interpretation berücksichtigt werden muss. Bei der Länge der Ereignisse ist der Trend wiederum 1982 und 2000 nicht konsistent. Wobei hier generell auffällt, dass die Länge südexponiert im Schnitt sehr groß ist, während nordexponiert im Jahr 2000 der kleinste Wert vorliegt. Allerdings wurde in dieser Zeitscheibe auch das drittlängste Ereignis des Datensatzes gefunden. Dieses liegt mit 623 m an der südexponierten Talseite.

Die Neigungen liegen in allen Zeitscheiben, mit Ausnahme von 1982 nordexponiert unter jenen der südexponierten Seite. Zwar schwanken die Werte relativ stark, die größten drei Mittelwerte finden sich aber in den südexponierten Talbereichen.

Bei der Größe der Einzugsgebiete stechen die Zeitscheiben 1974 und 1982 deutlich heraus mit ihrem klaren Verhältnis, während sich das Bild in Folge verändert und zum Teil in den

südexponierten Bereichen größere Flächen gefunden werden. Bei der Höhendifferenz ergibt sich keine einheitliches Bild. Generell kann gesagt werden, dass die beobachtete Verteilung in allen Zeitscheiben ähnlich verläuft, wobei vor allem 1982 generell, und teilweise auch jene von 2000, deutliche Differenzen aufweisen.

Tabelle 18: Übersicht der Murparameter der einzelnen Zeitscheiben, gegliedert nach Geologie, Anzahl der Muren/Ablagerungsgebiete im jeweiligen Gebiet in Klammer angeführt

	Gebiet	Länge [m]	Fläche [m ²]	Neigung [°]	Einzugsgebiet [m ²]	Höhendifferenz [m]
1974	Kalk (2/2)	216	3301	25,4	96.100	90
	Flysch (62/39)	158	323	31,4	9.600	93
	Sonstige (1/1)	154	181	21,4	24.100	60
1982	Kalk (11/5)	199	1546	25,8	25.800	99
	Flysch (8/6)	214	695	29,6	9.300	123
	Sonstige (1/1)	217	687	15,1	7.800	59
1995	Kalk (7/5)	233	965	31,2	17.800	129
	Flysch (12/6)	133	605	31,9	14.200	84
	Sonstige (0)					
2000	Kalk (1/0)	126		22,4	6.300	52
	Flysch (16/7)	178	648	28,9	18.400	93
	Sonstige (2/1)	171	157	13,3	23.000	52
2004	Kalk (8/8)	145	530	30,1	13.300	78
	Flysch (55/36)	151	334	33,8	13.400	95
	Sonstige (2/1)	130	90	17,1	63.000	35

Bei der Betrachtung der geologischen Gliederung (siehe Tabelle 18) erhält sich größtenteils das zuvor beschriebene Bild. Allerdings liegt die Murlänge im Kalk in drei Zeitscheiben unter jener des Flyschs. Zu den Scheiben von 1982 und 2000 kommt noch jene von 2004 hinzu. Allerdings trat 2000 nur ein Ereignis im Kalk auf. Die Ablagerungsflächen bleiben im Kalk generell größer. Auch die durchschnittliche Neigung der Murkanäle liegt nun im Kalk generell unter jener der Flyschbereiche. Bei der Größe der Einzugsgebiete und der Höhendifferenz bleibt nach wie vor ein eher uneinheitliches Bild. Zwar liegt die Fläche 1974, 1982 und 1995 im Kalk über jener des Flyschs, das Jahr 2000 (ein Ereignis) liegt aber darunter und die Flächen von 2004 sind gleich groß.

Die Ereignisse außerhalb dieser beiden Kategorien sind generell recht flach und weisen geringe Höhenunterschiede zwischen Start- und Endpunkt auf. Die Längen und Flächen der Muren liegen eher im unteren Bereich, streuen aber deutlich. Auch die Einzugsgebietsgröße lässt sich nicht eindeutig einordnen.

Für die beschriebenen Betrachtungen wurden, wie in Kapitel 4.5. erwähnt, zwei verschiedene Signifikanzberechnungen durchgeführt. Zum einen wurden die Differenzen innerhalb der geologischen Klassen zwischen den einzelnen Zeitscheiben ermittelt. Zum anderen wurden die Unterschiede innerhalb der Zeitscheiben zwischen den Einheiten ermittelt. Die Berechnungen wurden jeweils mit dem Kruskal-Wallis-Test durchgeführt.

Die Unterschiede zwischen den einzelnen Zeitscheiben innerhalb der Klasse „Kalk“ sind gemäß Test nicht signifikant (siehe Tabelle 19). Die Werte fangen bei 0,12 (Neigung Startpixel) an, die Länge liegt bei 0,33 und die Ablagerungsfläche bei 0,55. In der Klasse „Flysch“ hingegen (Tabelle 20) treten in den Parametern Ablagerungsfläche signifikante Unterschiede auf. Auch die Länge liegt mit 0,056 knapp an der Grenze.

Tabelle 19: Überprüfung der statistischen Signifikanz der Unterschiede zwischen den einzelnen Zeitscheiben, Gruppe Kalk

	Länge	Höhendifferenz	Fläche Ablagerungen	Einzugsgebiet	Neigung Startpixel
Chi-Square	4,572	5,076	2,117	,409	7,373
df	4	4	3	4	4
Asymp. Sig.	,334	,280	,548	,982	,117

Tabelle 20: Überprüfung der statistischen Signifikanz der Unterschiede zwischen den einzelnen Zeitscheiben, Gruppe Flysch

	Länge	Höhendifferenz	Fläche Ablagerungen	Einzugsgebiet	Neigung Startpixel
Chi-Square	9,214	3,091	11,345	1,798	3,884
df	4	4	4	4	4
Asymp. Sig.	,056	,543	,023	,773	,422

Für die Betrachtung innerhalb der Zeitscheiben wurden nur die Kategorien Kalk/Flysch herangezogen, da die Fallzahl der Klasse „Sonstiges“ zu gering war. Die Unterschiede waren im Regelfall nicht signifikant (siehe Tabelle 21). Die Irrtumswahrscheinlichkeit lag generell über 20%. Eine Ausnahme war die Zeitscheibe von 1995. Hier wurde die Höhendifferenz und die Länge des Murkanals als signifikant unter 0,05 ausgewiesen. Ansonsten ergab die Berechnung nur bei der Neigung des Murkanals für die Zeitscheibe von 2004 einen deutlichen Unterschied (Signifikanz: 0,09).

Tabelle 21: Überprüfung der statistischen Signifikanz der Unterschiede zwischen den geologischen Gruppen Flysch und Kalk für die Zeitscheibe 1995

	Länge	Höhendifferenz	Fläche Ablagerungen	Einzugsgebiet	Neigung Startpixel
Chi-Square	4,114	4,829	,000	,645	,457
df	1	1	1	1	1
Asymp. Sig.	,043	,028	1,000	,422	,499

Auch bei einem Vergleich der nord- und südexponierten Seite sind die Unterschiede in den meisten Fällen nicht signifikant. Die Zeitscheibe von 1995 ist identisch und in jener von 2004 ist die Ablagerungsfläche und die Neigung des Murkanals signifikant unterschiedlich (siehe Tabelle 22). Auch für die Unterschiede innerhalb der Klassen bleibt das Bild der geologischen Gliederung konsistent und die selben drei Parameter liegen an bzw. unter der Signifikanzgrenze.

Tabelle 22: Überprüfung der statistischen Signifikanz der Unterschiede zwischen den beiden Talseiten für die Zeitscheibe 2004

	Länge	Höhendifferenz	Fläche Ablagerungen	Einzugsgebiet	Neigung Startpixel
Chi-Square	1,898	,452	4,690	,226	,053
df	1	1	1	1	1
Asymp. Sig.	,168	,501	,030	,634	,818

7.1. Landnutzung

Die Landnutzung in den Einzugsgebieten hat sich von 1974 bis 2000 teilweise deutlich verändert (siehe Abbildung 19). Vor allem ein Trend ist bereits seit dem Ende des 19. Jahrhunderts existent und weiterhin ungebrochen. Und zwar die Zunahme bewaldeter Flächen im Untersuchungsgebiet. Diese Entwicklung und die zugehörigen historischen Aktivitäten der Wiederaufforstung sind unter anderem bei FLEZ und LAHOUSSE (2003, 112) aufgeführt, die einen Abriss über die Aktivitäten in zwei Einzugsgebieten der Region seit der Mitte des 19. Jahrhunderts geben.

In der Abbildung wurden die Kategorien verbautes Gebiet, Bergbau und Gewässer aufgrund ihres geringen flächenmäßigen Anteils (~1% der Fläche) nicht berücksichtigt.

Die bewaldeten Flächen sind seit 1974 von rund 39% auf 46% angestiegen, wobei der Großteil der Veränderungen nach 1982 stattfand. Ebenfalls gestiegen ist der Anteil an natürlichem Grünland von 11% auf 20%. Diese beiden Entwicklungen waren nur durch die kontinuierliche Abnahme der Weideflächen möglich. Die Grünland- und Weideflächen

gemeinsam betrachtet (also baumlose aber bewachsene Flächen) nahmen zwischen 1982 und 2000 von 29% auf 24% ab.

Leichte Veränderungen gab es auch im Bereich der landwirtschaftlichen Flächen und der Felsflächen. In beiden Kategorien sind die Schwankungen sehr gering und eine stichprobenartige visuelle Überprüfung für die Felsflächen ergab, dass ein Grossteil der Änderungen durch unterschiedliche Auffassungen bzw. Genauigkeiten bei der Kartierung zustande kamen.

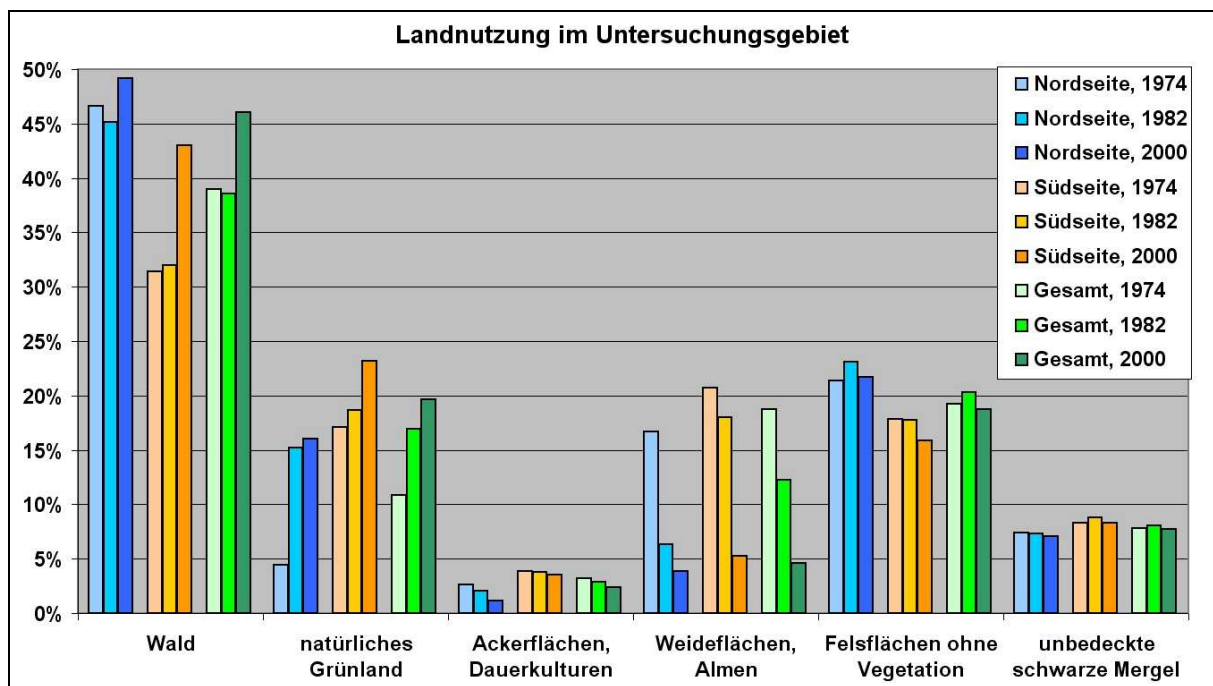


Abbildung 19: Landnutzung im Untersuchungsgebiet 1974, 1982 und 2000, gesamt und getrennt nach Talseite

Die Entwicklung der beiden Talseiten in Bezug auf die Landnutzung stellt sich unterschiedlich dar. Hierbei ist zu erkennen, dass sich die Waldfläche auf der Nordseite des Tals nur geringfügig verändert hat. Die Werte liegen im Bereich von 45-49%. Auf der Südseite hingegen hat sich der Anteil der mit Wald bedeckten Flächen zwischen 1974 und 2000 von 31 auf 43% erhöht, wobei der Zuwachs nahezu ausschließlich ab 1982 stattgefunden hat. Nach dem markanten Zuwachs liegt der Waldanteil nun auf beiden Talseiten in einer ähnlichen Größenordnung. Der Anteil an natürlichem Grünland lag zu Beginn der Untersuchung an der Nordseite mit 4% sehr gering, stieg aber bis 1982 auf 15% an. An der Südseite war er bereits 1974 bei 17% und stieg bis 2000 auf 23%. Die gegenteilige Entwicklung weisen die Weideflächen auf. Hier erfolgte eine direkte Verschiebung zwischen

den beiden Kategorien. Der Zuwachs an Waldfläche, vor allem an der Südseite erfolgte aber ebenso auf Kosten der Weideflächen. Zu berücksichtigen ist aber hierbei, dass sich teilweise die Skipisten der Station Super Sauze in Gebieten der Kategorie „natürliches Grünland“ befinden. Die Schwankungen der Kategorie Felsflächen liegen bei rund 1 km² (~2%) und sind wie bereits erwähnt auf die Kartierung zurückzuführen. Größere Veränderungen der Fläche der vegetationsfreien Felsbereiche und Mergel sind nicht festzustellen.

Da die meisten Muranrissgebiete in den hoch gelegenen Bereichen des Untersuchungsgebietes liegen, soll auch hier wieder, wie bereits in Kapitel 4.2.4. erwähnt, nur der Bereich über 1.900 m Seehöhe betrachtet werden. Hierbei verschiebt sich die Verteilung der Flächen deutlich. Die Felsflächen treten mit 40% in den Vordergrund. Ansonsten spielen weiterhin Grünland und Weideflächen, sowie Wald eine wichtige Rolle, wenn auch mit veränderten Anteilen (siehe Abbildung 20).

Die großen Veränderungen zwischen den Jahren finden sich vor allem zwischen Grünland und Weideflächen, wobei diese an der südexponierten Seite vor allem zwischen 1974 und 1982 stattgefunden haben. Auf der nordexponierten Talseite finden sich die großen Veränderungen zwischen 1982 und 2000, wobei auch hier eine Veränderung von Weideflächen zu Grünland, aber auch hin zu Wald zu finden ist.

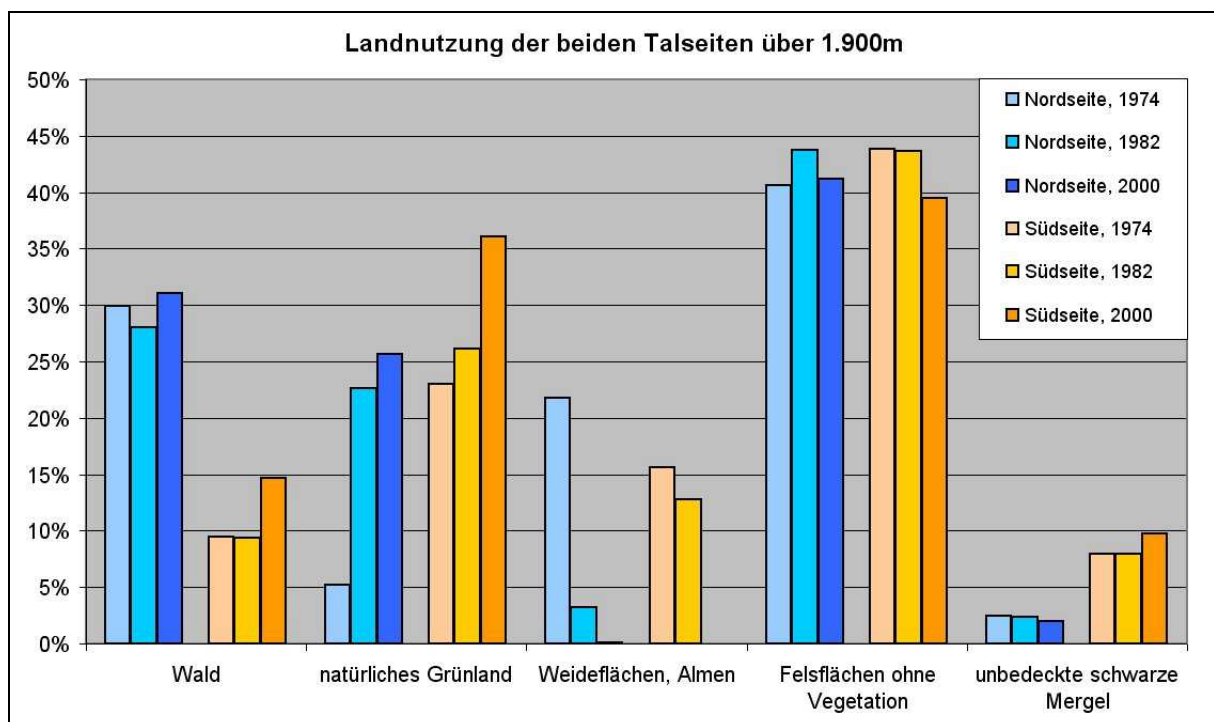


Abbildung 20: Landnutzung im Untersuchungsgebiet 1974, 1982 und 2000, getrennt nach Talseite für die Bereiche über 1.900 m Seehöhe

Die Veränderungen zwischen den einzelnen Zeitscheiben betrugen von 1974 bis 1982 auf der südexponierten Seite 24% der Flächen und 1982 bis 2000 18% der Fläche. Über den gesamten Zeitraum änderten sich jedoch nur 34% der Fläche was bedeutet, dass sich die Klassifikation von rund 8% der Gesamtfläche in beiden Perioden verändert hat.

An der nordexponierten Seite änderten sich in der ersten Periode lediglich 3% der Flächen. In der darauffolgenden Periode von 1982 bis 2000 erfolgten dann die großen Veränderungen im Ausmaß von 31% der Gesamtfläche. Hierbei ergaben sich durch die weitest gehende Konstanz zwischen 1974 und 1982 kaum doppelte Flächenänderungen.

Vergleicht man die Lage der Flächen die sich zwischen 1974 und 2000 verändert haben mit den Startpunkten der Murkanäle stellt man fest, dass an der südexponierten Talseite die Startbereiche im Regelfall oberhalb dieser Flächen liegen (siehe Abbildung 21). Einige Muren im Gebiet des Riou-Bourdoux liegen jedoch auch innerhalb dieser Flächen. Diese Flächen wurden von Weideland in Grünland umklassifiziert. Die Veränderungen hin zu Wald fanden in tiefer liegenden Gebieten statt.

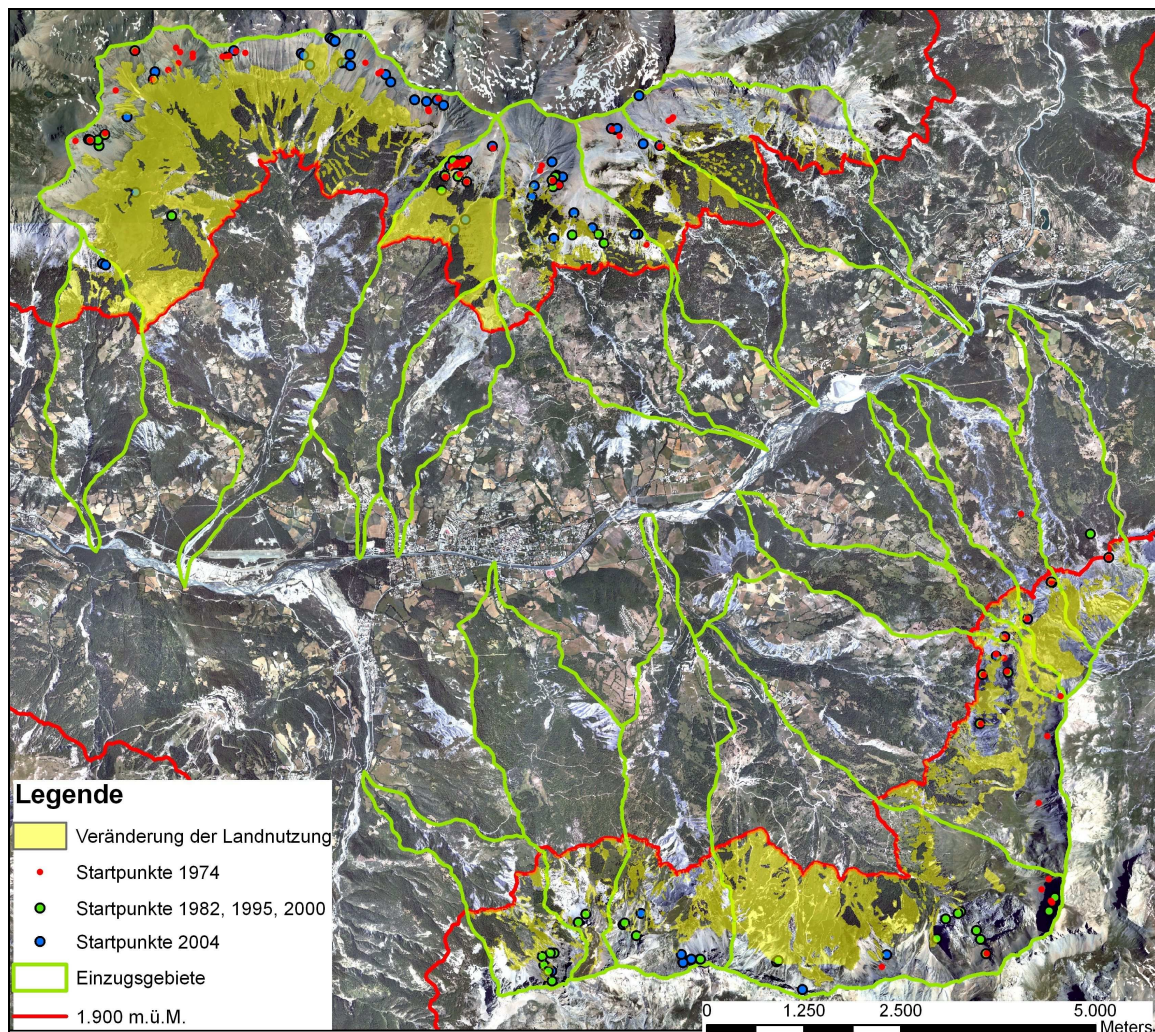


Abbildung 21: Flächen mit veränderter Landnutzung zwischen 1974 und 2000 im Vergleich zu den Startpunkten der Muren

An der nordexponierten Talseite, im Bereich der Einzugsgebiete Bourre, Bramafan, Poche und Frache ist eines der wenigen Gebiete, in denen es zu Änderungen in den hydrologischen Einzugsgebieten der Muren gekommen ist. In Abbildung 22 ist dieser Bereich vergrößert dargestellt. Zusätzlich wurden die Änderungen der Bewaldung und jene zwischen bewachsenen und unbewachsenen Flächen ergänzt. Auch die Einzugsgebiete der Startpunkte gemäß watershed Berechnung (siehe Kapitel 4.2.2.) wurden dargestellt. Bei diesem Gebiet handelt es sich um einen besonderen Bereich, in dem Kalkschichten innerhalb der Mergel an die Oberfläche treten und eine Geländestufe hervorrufen. An dieser kommt es zur Schuttproduktion und Murgängen, während sich darüber wieder ein flacherer Bereich mit Vegetation findet.

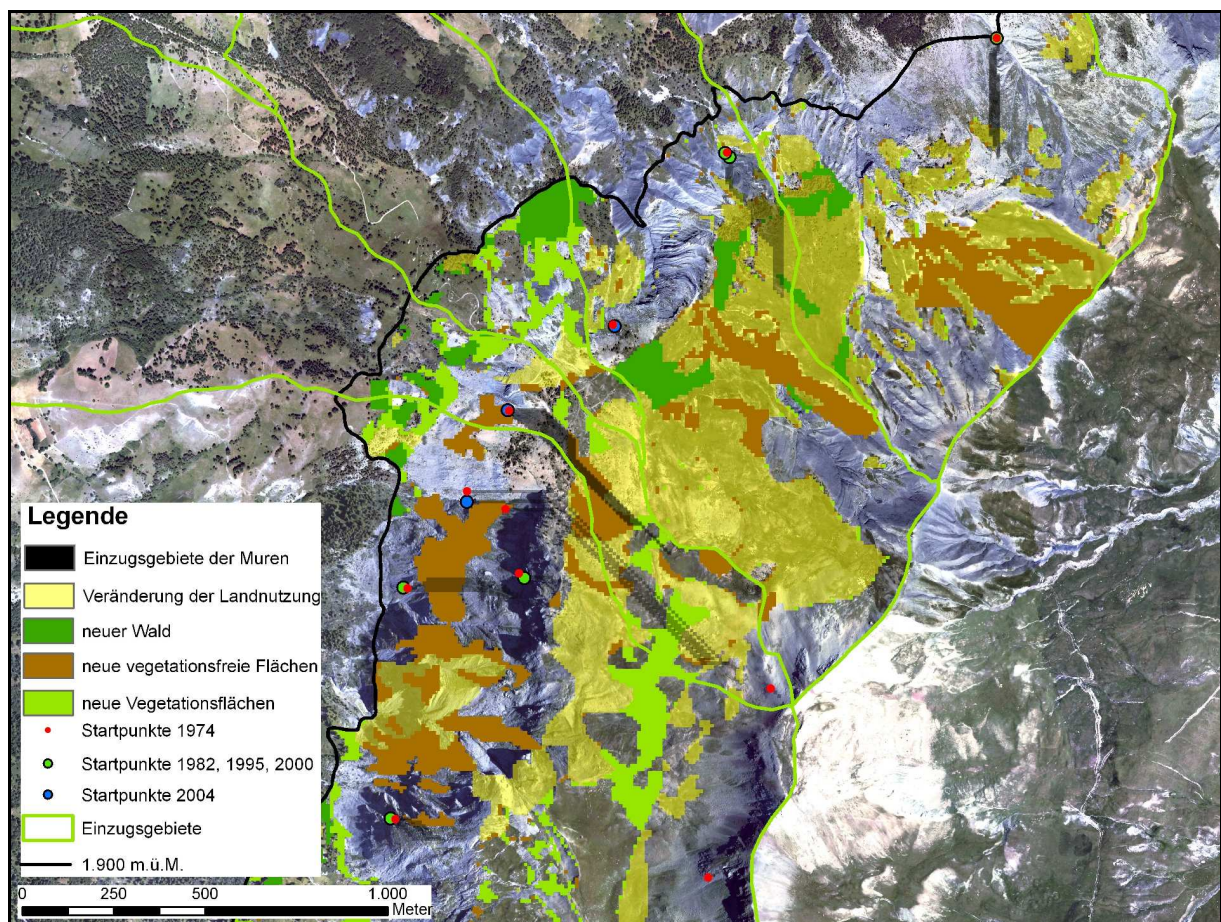


Abbildung 22: Landnutzungsänderung in einem Ausschnitt der nordexponierten Talseite zwischen 1974 und 2000 im Vergleich zu den Startpunkten der Muren

Es zeigt sich ein Mosaik aus verschiedensten Änderungen. Rodungen sind so gut wie keine ersichtlich, aber auch neue Bewaldung ist nur äußerst spärlich. Diese befinden sich auch nicht in den Einzugsgebieten. In diesen finden sich teilweise Änderungen zwischen bewachsenen und vegetationsfreien Flächen und allgemeine Änderungen. Diese Kategorie umfasst sämtliche anderen Änderungen, in diesem Fall also Änderungen zwischen Weideflächen und

Grünland. Die Abholzung bzw. Entfernung eines bestehenden Waldbestandes ist auf ein kleines Gebiet (~3.000m²) außerhalb der Einzugsgebiete der Muren beschränkt.

Durch die Trennung der Startpunkte in die unterschiedlichen Zeitscheiben kann gezeigt werden, dass sich trotz der Änderungen die Lage und das Auftreten der Murereignisse nicht verändert hat. Es sind immer wieder die selben Bereiche betroffen, wobei nicht in jeder Zeitscheibe ein Ereignis stattfinden muss.

Da einige Einzugsgebiete sehr stark von wichtigen Veränderungen (neue vegetationsfreie Flächen) betroffen sind aber keine entsprechenden Veränderungen der Muraktivität in diesem Bereich festgestellt wurden, erfolgte eine Verifizierung der Daten. Dabei wurden die Orthofotos von 1974 und 2004 in diesen Bereichen verglichen. Es wurde festgestellt, dass sich die Veränderungen aufgrund der Kartierung ergeben haben und sich keine Unterschiede feststellen lassen. Entsprechend ist auch die nicht eingetretene Reaktion erklärbar.

Der Großteil der Startpunkte der kartierten Muren liegt in Bereichen mit unbedeckten Fels. Außerhalb dieser Bereiche wurden in allen Zeitscheiben lediglich acht auf der nordexponierten Seite und 13 Startpunkte auf der südexponierten Seite gefunden. In Tabelle 23 ist eine Gegenüberstellung der Startgebiete für die einzelnen Zeitscheiben. Dabei ist zu beachten, dass unbedeckter Fels Schutthalden und andere unbewachsene, von Lockersediment bedeckte Bereiche inkludiert.

Tabelle 23: Verteilung der Murereignisse unter Berücksichtigung der Landnutzung und Talseite

	Muren	Unbedeckter Fels	Andere Bereiche	
			südexponiert	nordexponiert
1974	65	60	3	2
1982	20	15	1	4
1995	19	18	1	0
2000	19	15	3	1
2004	65	59	5	1

Die Anrissgebiete außerhalb des Fels liegen zumeist in der Klasse natürliches Grünland. Diese schließt aber zum Teil Rinnen und nur spärlich bewachsene Schuttbereiche und Ähnliches mit ein. Im Bereich der unbedeckten Mergel starten sieben Muren auf der nordexponierten Seite (1974, 4x1982, 2000, 2004). Diese Anzahl steht im Widerspruch zur Betrachtung anhand der Geologie. Wenn diese Bereiche betrachtet werden und mit der Klassifikation gemäß des geologischen Datensatzes verglichen werden, ist diese Anzahl zu bezweifeln. Diese Gebiete werden in diesem mit Kalkstein (4x) bzw. Schutt (2x)

gekennzeichnet. Die Klassifikation der Geologie ist auch durch zu Hilfenahme der Othofotos als realistisch einzuschätzen. In einem Bereich im Gebiet von St-Pons (südexponiert) liegen sechs Startpunkte im Wald. Dieser liegt unmittelbar unterhalb einer aktiven Schuttfläche. Das Waldstück wird offenbar immer wieder von Muren erreicht bzw. durchquert.

7.2. Niederschlag

Als zweite wesentliche Einflussgröße auf die Muraktivität wird nun der Niederschlag betrachtet. Wie bereits in Kapitel 4.6.2. erläutert, werden dabei folgende drei Werte verwendet:

- der maximale Tagesniederschlag
- der maximale 2-Tagesniederschlag
- die Anzahl der Ereignisse über 50 mm

In Abbildung 23 ist der maximale Tagesniederschlag dargestellt. Dabei sind neben der zu berücksichtigenden Niederschlagsmaxima zwischen Mai und November auch jene des gesamten Jahres dargestellt. Die Reduzierung des Zeitraums wirkt sich in 14 Jahren aus. Zwei Werte davon lagen vorher über 70 mm (1959, 1979), wobei 1979 dann immer noch über ein Ereignis mit über 50 mm verfügt. Zusätzlich gibt es in dieser Periode auch ein etwa gleich starkes Ereignis aus dem Jahr 1974. Das Ereignis von 1957 lag knapp unter 70 mm. In dieser Periode (1956 – 1974) hat sich das Maximalereignis von knapp über 70 mm auf etwas über 60 mm reduziert. Der Rest der entfallenden Werte lag unter 50 mm/d. Die drei explizit angeführten entfallenden Niederschlagsereignisse lagen dabei Mitte Dezember, Anfang März und Ende Jänner. Sie sind daher nicht als Grenzfälle anzusehen.

Man erkennt in der Abbildung, dass die maximalen Tagesniederschläge (Mai bis November) im wesentlichen zwischen 20 und 50 mm liegen. Nur in einem Jahr lagen diese darunter. Vom Jahr 1982 fehlen die kompletten Daten, weshalb hier keine Werte dargestellt sind. Über 50 mm/d wurde in 15 verschiedenen Jahren verzeichnet, wobei dieser Wert nur in drei verschiedenen Jahre (1970, 1991, 1999) zwei Mal überschritten wurde. Die intensivsten Ereignisse gab es mit jeweils über 70 mm/d in der Zeitscheibe 1982 und 2000, sowie 2004 mit über 80 mm.

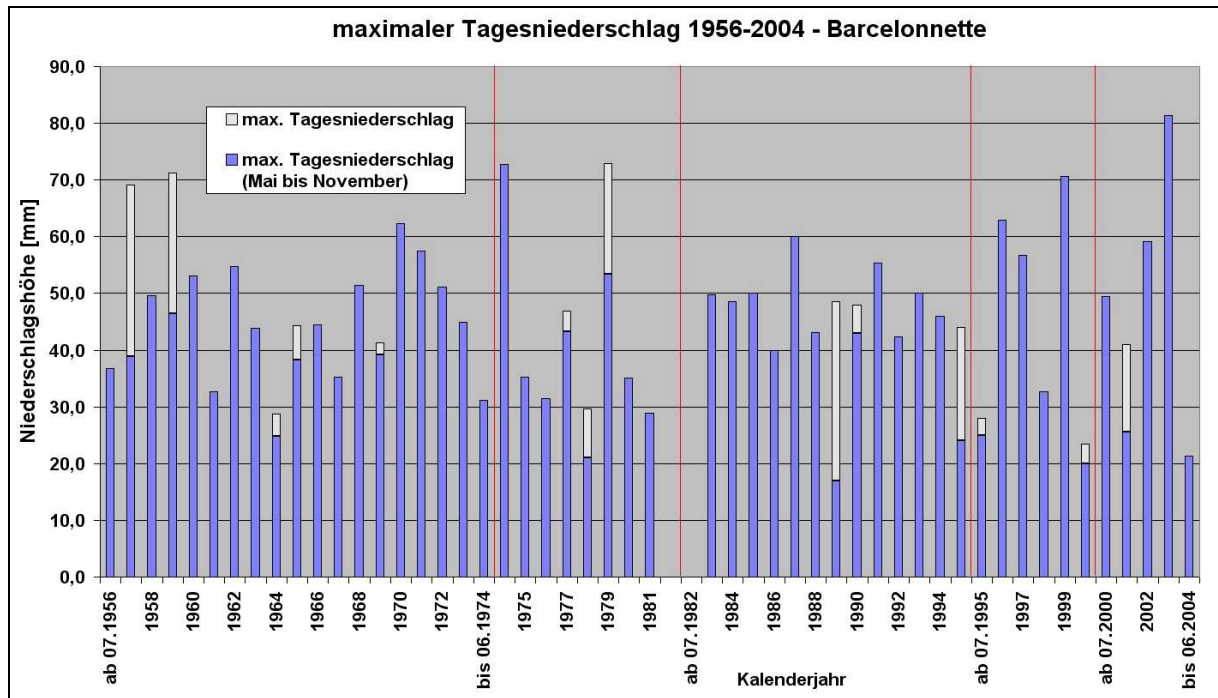


Abbildung 23: Maximaler Tagesniederschlag 1956-2004 für die Station Barcelonnette – Pont Long

Vergleicht man das Bild der Tagesniederschlagsmaxima mit den Murereignissen in den einzelnen Perioden fällt auf, dass jene von 2004 neben der sehr hohen Rate und Gesamtzahl auch das größte Niederschlagsmaxima aufweist. Auch die Zeitscheiben 1982 und 2000, mit moderaten Aktivitätsraten und einer Gesamtzahl von 20 bzw. 19 Murgängen, weisen Ereignisse über 70 mm/d auf. Die mangelnden Extreme zwischen 1956 und 1974 widersprechen aber diesem Bild, da es hier zu 65 Murgängen bei einer ähnlich großen Aktivitätsrate kam. Zur geringen Aktivität in der Periode bis 1995 passt das fehlende Starkniederschlagsereignis, obwohl auch hier 19 Muren identifiziert wurden.

Betrachtet man für den Untersuchungszeitraum die 2-Tagesmaxima (Abbildung 24), so zeigt sich ein etwas anderes Bild. Es sind generell große Schwankungen festzustellen, die ein unruhiges Bild der Niederschläge zeichnen. Die Maxima in den einzelnen Perioden liegen relativ gleich bei knapp unter 100 mm/2d in den Jahren 1960, 1991 und 2002. Die beiden anderen Zeitscheiben (1982 und 2000) weisen Maxima von 83 bzw. 92 mm/2d auf. Es fällt auf, dass sich die Tagesmaxima in dieser Darstellung nicht mehr deutlich hervorheben, sondern andere Jahre die größten Werte aufweisen.

Im Vergleich mit der Anzahl und Rate der Murereignisse ergibt sich auch hier kein eindeutiges Bild. Zwar ist nun auch in der Zeitscheibe von 1974 ein hoher Wert zu finden, aber die Zeitscheiben 1982 und 1995 passen nicht recht ins Bild. So findet sich 1991 eines der

stärksten Ereignisse, während die Rate sehr niedrig ist. Die Zeitscheibe von 1982 hingegen verfügt nur über ein Ereignis mit 83 mm/2d, weist aber bei 20 Muren eine moderate Aktivitätsrate auf.

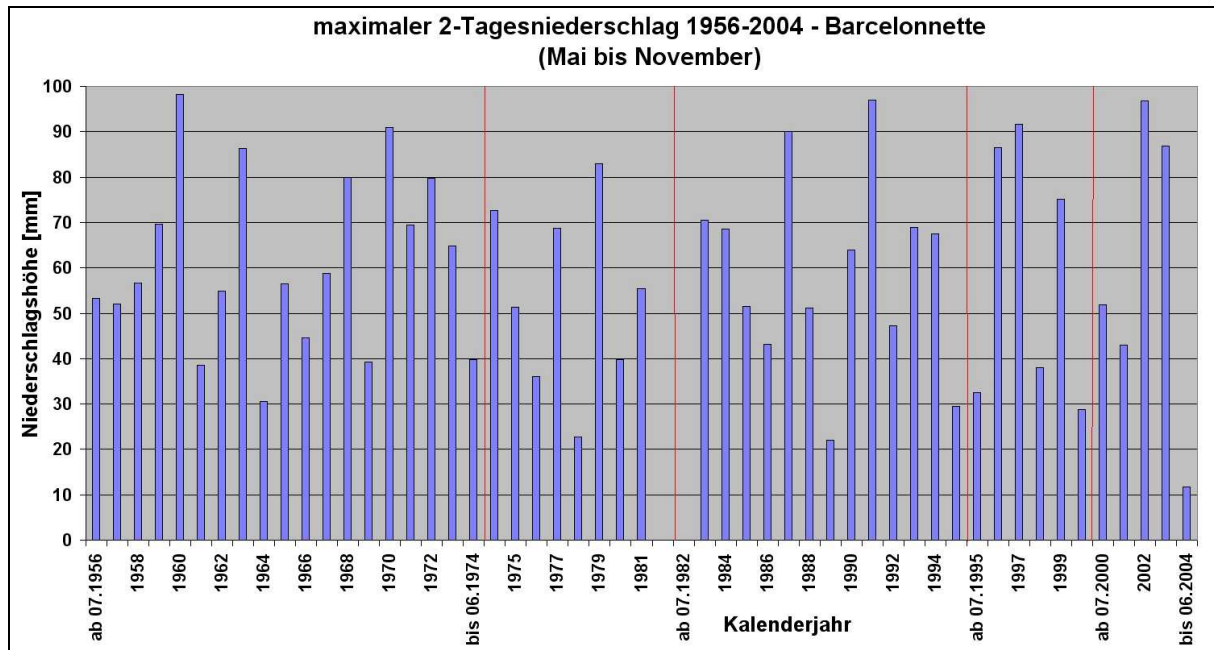


Abbildung 24: Maximaler 2-Tagesniederschlag 1956-2004 für die Station Barcelonnette – Pont Long

Wie die Grafik und die Erläuterungen bereits erahnen lassen, ergeben sich keine guten Korrelationswerte zwischen der Niederschlagsparametern und der Muraktivität (siehe Tabelle 24). Dabei wurde der Koeffizient nach Pearson berechnet, obwohl das Kriterium der Normalverteilung nicht erfüllt war. Aber dieser Test berücksichtigt die Abstände zwischen den Werten, was im Fall des Niederschlages als wichtiges Kriterium erachtet wurde. Zusätzlich wurde der eigentlich zulässige Test nach Spearman durchgeführt.

Die beste Übereinstimmung zwischen der Muranzahl in einer Periode und dem Niederschlag ergibt sich mit einem Wert von 0,6 mit dem maximalen 2-Tagesniederschlag. Allerdings liegt die Signifikanz bei 0,29 und der Zusammenhang ist damit kaum aussagekräftig. Die beiden anderen Niederschlagsparameter ergeben keine starke Korrelation. Nach der Rangordnungsmethode (Spearman) verschiebt sich das Bild deutlich, bleibt aber auch hier nicht signifikant.

Die Aktivitätsrate sollte lediglich mit der Anzahl der Ereignisse über 50 mm verglichen werden. Aber auch hier ergibt sich kein aussagekräftiger Wert. Ein Vergleich der Rate, also einer über einen Zeitraum gemittelten Größe mit den beiden anderen Niederschlagsgrößen die ein Einzelereignis darstellen, ist nicht sinnvoll. Es würde sich mit dem maximalen

Tagesniederschlag bei beiden Berechnungsmethoden ein relativ starker Zusammenhang ergeben, aber das zugehörige Erklärungsmodell und eine ausreichend hohe Signifikanz fehlt. Generell fallen aber die großen Unterschiede zwischen den beiden Berechnungsmethoden auf. Wobei generell die Aussagekraft der Tests bei der geringen Anzahl von fünf Fällen zu hinterfragen ist.

Tabelle 24: Korrelationsmatrix zum Zusammenhang zwischen Niederschlag und Ereignisse

Pearson Korrelation		max. Tagesniederschlag	max. 2-Tagesniederschlag	Niederschlag über 50mm
Anzahl	Pearson Correlation	0,266	0,596	0,391
	Sig. (2-tailed)	0,665	0,289	0,515
	N	5	5	5
Rate	Pearson Correlation	0,807	0,307	-0,341
	Sig. (2-tailed)	0,099	0,615	0,574
	N	5	5	5
Spearman Korrelation		max. Tagesniederschlag	max. 2-Tagesniederschlag	Niederschlag über 50mm
Anzahl	Correlation Coefficient	0,474	0,316	-0,081
	Sig. (2-tailed)	0,42	0,604	0,897
	N	5	5	5
Rate	Correlation Coefficient	0,7	-0,1	-0,051
	Sig. (2-tailed)	0,188	0,873	0,935
	N	5	5	5

In weiterer Folge wird noch ein möglicher Zusammenhang zwischen Niederschlag und Murparametern untersucht (siehe Tabelle 25). Dabei ergibt sich bei der Korrelation der Länge und der Fläche der Ablagerungsgebiete kein Zusammenhang mit dem maximalen Tagesniederschlag. Auch die Größe des Einzugsgebietes und die Neigungen zeigen im Mittel keinen Zusammenhang. Mit dem 2-Tagesniederschlag allerdings gibt es mit allen Variablen bei der Pearson-Korrelation einen starken (alle Werte über 0,75) Zusammenhang. Er ist auch für die Länge, den Median der Ablagerungsfläche und die Neigung der Start- und Endpixel des Murkanals signifikant auf dem 0,05% Niveau. Allerdings ist der Zusammenhang negativ. Dass würde bedeuten, dass mit zunehmendem Niederschlag die Länge und Fläche der Murereignisse abnimmt. Nach Spearman sind die Zusammenhänge zwar auch noch relativ stark (über 0,6) aber nicht mehr signifikant. Hier überschreitet die Größe des Einzugsgebietes die Signifikanzgrenze.

Tabelle 25: Korrelationsmatrizen zum Zusammenhang Niederschlag und Murparameter

Korrelation nach Pearson		durchschn. Länge	median Länge	durchschn. Fläche	median Fläche	Einzugs- gebiet	Neigung Murkanal	Neigung Startpixel	Neigung Endpixel	Höhen- differenz
max. Tages- niederschlag	Pearson Cor.	-0,062	0,027	-0,269	0,002	0,307	-0,037	-0,233	-0,160	-0,178
	Sig. (2-tailed)	0,921	0,966	0,662	0,997	0,616	0,953	0,706	0,797	0,775
	N	5	5	5	5	5	5	5	5	5
max. 2-Tages- niederschlag	Pearson Cor.	-,930(*)	-,920(*)	-0,762	-,914(*)	-0,816	0,840	,880(*)	,887(*)	-0,547
	Sig. (2-tailed)	0,022	0,027	0,134	0,030	0,092	0,075	0,049	0,045	0,340
	N	5	5	5	5	5	5	5	5	5

*. Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

**. Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

Korrelation nach Spearman		durchschn. Länge	median Länge	durchschn. Fläche	median Fläche	Einzugs- gebiet	Neigung Murkanal	Neigung Startpixel	Neigung Endpixel	Höhen- differenz
max. Tages- niederschlag	Cor. Coefficient	-0,100	0,000	-0,300	0,000	0,200	0,000	-0,400	-0,400	-0,200
	Sig. (2-tailed)	0,873	1,000	0,624	1,000	0,747	1,000	0,505	0,505	0,747
	N	5	5	5	5	5	5	5	5	5
max. 2-Tages- niederschlag	Cor. Coefficient	-0,700	-0,600	-0,500	-0,600	-,900(*)	0,600	0,700	0,700	-0,100
	Sig. (2-tailed)	0,188	0,285	0,391	0,285	0,037	0,285	0,188	0,188	0,873
	N	5	5	5	5	5	5	5	5	5

*. Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

**. Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

8 Diskussion

Nach der Darstellung der Ergebnisse wird nun deren Bedeutung und Aussagekraft beleuchtet. Als erster Punkt soll dabei die Qualität der Daten und die daraus folgenden Konsequenzen behandelt werden. Danach erfolgt die Diskussion anhand der in Kapitel 1 aufgestellten Hypothesen und Fragestellungen.

8.1. Datenqualität

Als wichtiger Punkt für die Interpretation wird der Einfluss der Datenqualität auf die Ergebnisse gesehen. Vor allem bei der Kartierung der Orthofotos spielt dies eine wesentliche Rolle. Die Qualität des DGM's ist vor allem für die Größe der Einzugsgebiete von Bedeutung. Hier musste aufgrund der Ungenauigkeiten in der Lage zwischen dem DGM und den Orthofotos mit einem Filter gearbeitet werden. Für die Höhenlage der Muren sind die Anforderungen eher gering. Allerdings ist die Qualität für die Hangneigungen von Bedeutung. Ein feineres Modell würde sicherlich teilweise größere Werte liefern, da die Mittelung über eine geringere Strecke erfolgen würde. Andererseits würde sich ein Lagefehler deutlicher auswirken und wie die Ergebnisse zeigen, sind die Neigungswerte plausibel (vgl. RICKENMANN und ZIMMERMANN 1993) und in der Reihenfolge (Startpunkt > Murkanal > Endpunkt) konsistent. Auch die exakte Festlegung der Start- und Endpunkte ist durch die Rastergröße von 10 m von geringerer Bedeutung.

Die räumliche als auch spektrale Auflösung der Orthofotos ist entscheidend für die Identifikation der Ereignisse. Die in Kapitel 3.1. aufgelistete Auflösung gibt aber nicht die tatsächliche Qualität der Orthofotos wieder. So weisen die Bilder von den Jahren 2000 und 2004 zwar die selbe Pixelgröße auf, sind aber in der visuellen Betrachtung deutlich unterschiedlich. So ist das Bild von 1974 deutlich besser einzuschätzen als jenes von 2000, obwohl die Pixelgröße doppelt so groß ist. Diese lässt nämlich keinen direkten Zusammenhang mit der Qualität erkennen, da sie unabhängig von den Ausgangsdaten festgelegt werden kann.

Um etwaige Zusammenhänge zwischen der Datenqualität und den Kartierungsergebnissen abschätzen zu können, sind diese auch korreliert worden. Diese weist generell negative Werte auf. Daher ist in Zeitscheiben mit vielen Ereignissen mit geringeren Mittelwerten zu rechnen. Es liegt also die Vermutung nahe, dass auf den besseren Bildern kleinere Strukturen erkannt werden können. Allerdings ist die Länge nicht das Kriterium bei der Kartierung, da diese die

Auflösung um ein vielfaches übersteigt. Aber die Breite der Ereignisse ist von Bedeutung. Es kann also angenommen werden, dass aufgrund der besseren Qualität schmalere oder geringer ausgeprägte Ereignisse erkannt werden können und diese im Regelfall kürzer sind. Entsprechend dieser Argumentation sind auf den beiden qualitativ hochwertigsten Bildern (2004 und 1974) mit jeweils 65 Ereignissen auch die meisten Muren mit den geringsten Durchschnittswerten (Länge und Ablagerungsfläche, siehe Abbildung 18) identifiziert.

Es ist zwar davon auszugehen, dass die Bildqualität eine wichtige Rolle spielt, aber die hohe Aktivität zwischen 2000 und 2004 ist wohl vor allem auf den intensiven Niederschlag von 2003 zurückzuführen.

Für 1974 spielt die Auflösung aber definitiv eine Bedeutung. Wobei hier vor allem die schlechte Qualität des Bildes von 1956 eine Rolle spielt. Dadurch wurden mit großer Wahrscheinlichkeit zahlreiche Ereignisse, die vor 1956 stattfanden, in diese Periode verschoben, da sie auf dem älteren Bild nicht erkennbar waren. Die Größe dieses Effekts kann aber nicht bestimmt werden.

8.2. Kartierungsergebnisse

Durch die systematische Untersuchung der Orthofotos und deren Vergleich konnten eine Vielzahl von Murereignissen gefunden werden. Allerdings wurden damit im Wesentlichen kleinere Strukturen in den obersten Bereichen der Einzugsgebiete außerhalb der Hauptgerinne identifiziert. In tiefer liegenden Bereichen (z.B. den Badlandgebieten), wo ebenfalls Muren ihren Ursprung nehmen können oder direkte Anrisse in den Bächen konnten nicht identifiziert werden. Die Auflösung der Orthofotos bzw. die generelle Aktivität und Veränderung der Bäche verhinderte eine Identifizierung. Dass Ereignisse das Tal erreichen beziehungsweise auch in den kleineren, hier nicht erfassten Gerinnen in Talnähe auftreten ist z.B. in der Arbeit von REMAITRE (2006, 77) belegt. Dieser Umstand der räumlich begrenzten Erfassung in den meist vegetationsfreien Bereichen ist in weiterer Folge immer zu berücksichtigen.

Die Aktivität an der südexponierten Talseite überwiegt jene der nordexponierten Seite in etwa um das Doppelte, was die Anzahl und den Wert pro Flächeneinheit betrifft. Die Flächen über 1.900 m und die unbedeckten Felsflächen auf der nordexponierten Talseite liegen bei rund 80% der Fläche der südexponierten Seite. Damit ist die Aktivität bezogen auf diese Flächen an der nordexponierten Seite verhältnismäßig noch kleiner.

Neben der Gesamtfläche sind wohl auch die Bereiche mit rund 30-45° Neigung innerhalb der Gebiete von Bedeutung. In diesen liegen immerhin 75% aller Startpixel. Zwischen der nordexponierten und südexponierten Talseite unterscheidet sich die Verteilung dabei deutlich. Südexponiert macht diese Kategorie rund 45% (9,8 km²) der Gesamtfläche aus, während sie nordexponiert nur 30% (5,3 km²) Fläche aufweist. Dieser Umstand ist für die Aktivität sicherlich von Bedeutung und kann einen großen Teil der stärkeren Aktivität der südexponierten Seite erklären. Diese steilen Bereiche liegen mit 5,9 bzw. 3,6 km² auch verstärkt in den Gebieten der unbedeckten Felsflächen.

Ein weiterer wichtiger Punkt für die Unterschiede zwischen den beiden Talseiten liegt in der Geologie begründet. Südexponiert wird eine Fläche von 9,7 km² als Flysch ausgewiesen, nordexponiert 1,7 km² Flysch und 1,9 km² Kalkstein. Auf der nordexponierten Seite treten damit in Bezug auf die Fläche gleich viele Muren in den beiden geologischen Klassen auf (29 im Kalk, 30 im Flysch). Damit kann nicht von einer unterschiedlich starke Schuttproduktion der beiden Gesteine ausgegangen werden. Im Gegensatz dazu erscheint die Aktivität der steilen, südexponierten Seite gering, da die Fläche des Flyschs im Verhältnis mit 2,7 deutlich größer als die Muranzahl ist. Es ist aber bei dieser Betrachtung zu berücksichtigen, dass die geologischen Flächen ja teilweise von Vegetation bedeckt sind und daher nicht als Quell- und Startgebiete in Frage kommen.

Wenn nur die unbedeckten Flächen berücksichtigt werden sinkt die Fläche der südexponierten Talseite auf 6,4 km². Nordexponiert bleibt sie mit 1,5 km² im Flysch und 1,7 km² im Kalk annähernd konstant. Nach dieser Einschränkung liegt das Verhältnis zwischen den beiden Talseiten bei Muren und Felsflächen in etwa gleich auf und es ergeben sich keine Unterschiede.

Interessant ist in diesem Zusammenhang aber der Umstand, dass rund 90% der Murereignisse die das Tal erreichen an der südexponierten Talseite stattfinden (REMAITRE et al. 2005). Damit liegt ein deutlicher Unterschied zwischen diesen Bereichen vor. Während an der nordexponierten Talseite die Muren auf die Schuttfächer unter den Felshängen beschränkt bleiben oder sich im Einzugsgebiet ablagern, erreichen sie auf der anderen Seite das Tal. Ein Grund dafür ist neben dem Auftreten von Quellen an der oberen Schichtgrenze der Mergel durch unterschiedliche Durchlässigkeiten an der südexponierten Talseite die größere Neigung der Gerinne (REMAITRE et al. 2005).

Auch die Höhenlage der Murereignisse ist unter diesem Gesichtspunkt zu sehen. Die Höhe selbst ist hier nicht der ausschlaggebende Faktor, sondern folgt der Verteilung der Fels- und

Schuttflächen sowie der Hangneigung. Das ist auch am Unterschied zwischen der nord- und südexponierten Talseite gut zu erkennen. An der südexponierten Seite ist das Gebirge generell höher, weshalb sich die Gipfel und die zugehörigen Felswände auch weiter nach oben verschieben. Entsprechend verschiebt sich auch die Lage der Murereignisse.

8.3. *Murparameter*

Bei der Analyse der Murparameter konnte festgestellt werden, dass es eine mittlere Korrelation zwischen der Länge der Muren und der Größe der Ablagerungsfläche gibt (siehe Tabelle 8). Der Zusammenhang wurde als hoch signifikant ausgewiesen und liegt bei 0,58. Für diesen Zusammenhang sind zwei Mechanismen vorstellbar. Einer davon ist die zusätzliche Materialaufnahme während des Fließvorgangs. Es ist bei Talmuren zu beobachten, dass die initiale Materialmenge im Bereich des Starts im Verhältnis zur später akkumulierten Menge äußerst gering ist (JAKOB et al. 2000; REMAITRE et al. 2005). Der zweite Punkt ist die Vorstellung, dass größere Ereignisse generell mehr Energie aufweisen und daher weitere Strecken zurücklegen können – also ein direkter Zusammenhang der im initialen Fehler begründet liegt. Ein Zusammenhang zwischen Länge, Höhenunterschied und Volumen wurde unter anderem von RICKENMANN (1999) erwähnt. Wobei natürlich zu berücksichtigen ist, dass die Ablagerungsfläche nicht als direkt proportional zum Volumen gesehen werden kann.

Bei der getrennten Analyse der Talseiten und der Geologie fällt sofort der generelle Unterschied auf. Die Bereiche im Kalk, an der nordexponierten Talseite sind länger, verfügen über größere Ablagerungsflächen und weisen größere Einzugsgebiete auf, sind aber generell flacher. Diese Unterschiede sind im Wesentlichen auch statistisch signifikant. Auch die Korrelationen im Bereich Kalk sind sehr stark. Offensichtlich gibt es hier aufgrund der morphologischen Unterschiede und der Materialeigenschaften unterschiedliche Ausprägungen der Ereignisse. So sind die Ereignisse südexponiert, wie im Gebiet des Riou Bourdoux, oft an die Felsrinnen in den Wänden gebunden. Im Kalk der nordexponierten Talseite, aber auch in deren Flyschbereich fehlen aufgrund der niedrigeren Wände diese Rinnen und ihre Kegel, weshalb die Ereignisse nahezu ausschließlich auf Schuttflächen auftreten. Die generell guten Korrelationen im Kalk (Tabelle 13) sind aber aufgrund der geringen Fallzahl zu hinterfragen. Es erscheint logisch, dass mit zunehmender Höhe das Einzugsgebiet und die Ablagerungsfläche kleiner wird, da es sich im Gegenzug um immer steilere Bereiche handelt.

Aber dieser Umstand ist wohl auf eine spezielle topographisch-morphologische Situation zurückzuführen und kein generelles und allgemein anwendbares Verhalten.

8.4. Zeitliche Variabilität

Die zeitliche Aktivität zwischen 1956 und 2004 ist schwierig zu interpretieren. Prinzipiell zeigt sich ab der Periode bis 1974 eine generell abnehmende Aktivität bis 1995. Danach steigt sie wieder und erreicht 2004 einen außergewöhnlich hohen Wert. Es wirkt also, als hätte sich nach einer intensiven Periode 1956 – 1974 das System „beruhigt“ und wäre zu einem späteren Zeitpunkt durch die Nachlieferung von Material entsprechend dem Dispositionsmodell und in Verbindung mit höheren Niederschlägen 1999 und 2003 wieder verstärkt aktiv geworden.

Dabei sind aber einige wichtige Punkte zu berücksichtigen. Einer davon ist die stark schwankende Dauer der Zeitscheiben. Diese ist sicher von Bedeutung da auch davon auszugehen ist, dass sich die Murstrukturen in manchen Gebieten nicht lange halten. Außerdem werden mögliche tatsächlich auftretende Aktivitätsperioden über längere Zeiträume gemittelt, wodurch die Interpretierbarkeit deutlich verschlechtert wird.

Ein weiterer wesentlicher Punkt ist die unterschiedliche Qualität der verwendeten Orthofotos. Es fällt auf, dass die beiden qualitativ hochwertigsten Fotos (2004 und 1974) die höchste Anzahl an identifizierten Ereignissen aufweisen. 2004 über einen sehr kurzen Zeitraum, 1974 bei einer schlechteren Qualität aber im Vergleich zu einem bereits 18 Jahre zurückliegendem Orthofoto mit schlechter räumlicher und spektraler Auflösung.

Allerdings wurde eine ähnliche Studie von JOMELLI et al. (2003) rund 50 km nördlich im Massif des Ecrins durchgeführt, die zu ähnlichen Ergebnissen kam. Die zeitliche Auflösung war zwar höher, wurde aber zu Abschnitten mit 20 Jahren Dauer gruppiert. Hier zeigte sich, wenn auch statistisch nicht signifikant, eine Abnahme der Ereigniszahl zwischen den Perioden 1960-1979 und 1980-2000. Ob es sich hierbei um einen klimatischen Trend handelt kann nicht eindeutig gesagt werden.

In der Arbeit von REMAITRE (2006, 79) wurden für die Region Barcelonnette zwischen 1950 und 2000 viele Murereignisse verzeichnet. Vor allem von 1960-1970 (12 Ereignisse) und 1970-1980 (10 Ereignisse) lag die Zahl sehr hoch. Danach lag sie mit sieben bzw. sechs Ereignissen pro Dekade zwar weiterhin relativ hoch, im Vergleich zu den beiden vorangegangenen Jahrzehnten aber deutlich geringer. Zwischen 2000 und 2004 ereigneten sich fünf Murgänge. Damit zeigen diese Daten, die sich auf Ereignisse in tiefer liegende Bereiche der Einzugsgebiete in den Gerinnen beziehen eine relativ gute Übereinstimmung mit

den hier erhobenen Muren. Es ist hervorzuheben, dass die Ereignisse in den Quell- und Startbereichen in den hoch liegenden Gebieten offensichtlich eine synchrone Aktivität wie jene haben, die in den Gerinnen auftreten. Es besteht die Möglichkeit, dass es sich dabei um ein klimatisches Signal handelt, da auch die Studie von JOMELLI et al. (2003) einen ähnlichen Trend aufweist. Ob nun beide Bereiche (Quellgebiete und Gerinne) in der Barcelonnette Region auf den selben Auslöser reagieren oder die Aktivität und Materialnachlieferung Muren in den tieferen Bereichen forcieren, kann nicht gesagt werden.

Die erste Forschungsfrage gemäß Kapitel 1 nach der Variabilität kann nun entsprechend den Erläuterungen beantwortet werden. Trotz der Einschränkungen und Unsicherheiten ist davon auszugehen, dass es sich nicht um einen konstanten Prozess handelt sondern die Aktivität schwankt. Die beiden angeführten Untersuchungen unterstützen durch den ähnlichen Verlauf die These, dass es sich tatsächlich um eine Schwankung handelt und die Beobachtungen nicht lediglich auf Probleme mit den Daten zurückzuführen sind.

Dieses Bild der Aktivität ist im Wesentlichen unabhängig von der Gliederung der Teilräume. Es bleibt sowohl bei der Gliederung gemäß Talseite, als auch bei jener der Geologie im Wesentlichen konsistent, mit Ausnahme der Zeitscheibe von 1982. Diese weist einen gegenteiligen Trend, mit starker Aktivität der nordexponierten Talseite auf.

Diese Unterschiede betreffen aber nicht nur die Anzahl, sondern auch die Eigenschaften der Murereignisse. Wie in Abbildung 18 zu erkennen ist, liegen die Durchschnittswerte der Murkanallänge und der Ablagerungsflächen deutlich über jenen der anderen Zeitscheiben. Dies beruht aber nicht wie erwartet auf der Häufung der Ereignisse an der nordexponierten Talseite, die im Mittel größere Werte aufweisen (siehe Tabelle 17 und 18). Es sind im Gegenteil, bei der Länge vor allem jene Ereignisse im Flysch, die sehr hohe Werte aufweisen. Bei den Ablagerungsgebieten sind es außergewöhnlich große Flächen in den Kalkgebieten. Hier sind auch die Einzugsgebiete relativ groß.

Ein wichtiger Grund für die Abweichungen in dieser Zeitscheibe ist sicher die Qualität des Orthofotos. Dieses weist in den nordexponierten Bereichen (besonders gut zu erkennen im Riou-Chanal) eine bessere Schärfe und Kontrast auf als zum Beispiel das Bild von 1974. Im Gegenzug ist der Kontrast auf der südexponierten Talseite sehr schlecht. Allerdings kann eine erhöhte Aktivität in diesem Bereich in der entsprechenden Periode auch nicht vollkommen ausgeschlossen werden.

Die dargestellten Ergebnisse und Unterschiede zwischen den einzelnen Zeitscheiben sind im Regelfall nicht signifikant. Der Test der Unterschiede zwischen den Klassen Kalk in den einzelnen Zeitscheiben weist keinerlei statistische Signifikanz auf. Ein wesentliches Problem bei diesen Tests ist aber die geringe Fallzahl der vorliegenden Untersuchung. Diese, in Verbindung mit der großen Streuung der Werte in den einzelnen Klassen, sorgen für die geringe Aussagekraft der Ergebnisse. Vor diesem Hintergrund sind sämtliche statistische Tests zu sehen und in der Bewertung der Ergebnisse zu berücksichtigen.

Dies wird auch deutlich wenn die Ergebnisse des Vergleichs der Talseiten bzw. der Geologie in Summe signifikant sind, in den einzelnen Zeitscheiben aber diese Werte nicht reproduziert werden können. Die erforderlichen Rangunterschiede können bei den vorhandenen geringen Fallzahlen in den Einzelbetrachtungen offensichtlich nicht erreicht werden.

Die zweite Forschungsfrage, die sich mit dem Verhalten der Variabilität in den unterschiedlichen Teilgebieten beschäftigt, muss mit nein beantwortet werden. Im Wesentlichen zeigte sich in allen Untergliederungen ein, wenn auch mit gewissen Schwankungen verbunden, ähnliches Bild. Diese Schwankungen werden als nicht ausreichend erachtet um ein unterschiedliches Verhalten zu unterstellen. Wobei hier die geringe Fallzahl sicher auch von Bedeutung ist. Die Zeitscheibe 1982, die sich anders darstellt kann nicht als Beleg für ein unterschiedliches Verhalten gewertet werden. Diese muss, wie zuvor erläutert im Zusammenhang mit der schwankenden Qualität innerhalb der Orthofotos gesehen werden.

8.5. Landnutzung

Die Veränderungen der Landnutzung im Zeitraum von 1974 bis 2000 spielen wie bereits erwähnt für die Muraktivität in den hier untersuchten Gebieten keine Rolle. Zwar änderte sich in diesem Zeitraum die Landnutzung durchaus beträchtlich, allerdings liegen die betroffenen Gebiete generell tiefer als die beobachteten Ereignisse. Dies soll nicht bedeuten, dass die beobachteten Veränderungen vor allem von Weideflächen zu Grünland und auch zu Waldflächen keinen Einfluss auf das Einzugsgebiet ausüben. Es ist wie in Kapitel 2.5.1. beschrieben durchaus mit Einflüssen auf die Hangstabilität, die Erosionsgefährdung und die Abflussbildung zu rechnen. Allerdings betrifft das eher die Materialnachlieferung und die folgende Aktivierung innerhalb der Gerinne in den stromabwärts gelegenen Gebieten. Diese

konnten aber in der Untersuchung nicht erfasst werden. Auch ist wohl davon auszugehen, dass steile, vormals von Erosion betroffene potentielle Anrissgebiete bereits vor 1974 wiederaufgeforstet wurden. Diese sensiblen Gebiete waren wohl die ersten „sanierten“ Flächen und wurden wahrscheinlich bereits am Ende des 19. Jahrhunderts aufgeforstet. Die Gebiete die den beobachteten Veränderungen unterlagen sind wohl generell von geringerer Anfälligkeit.

Allerdings kann die Landnutzung nichtsdestotrotz einen Einfluss auf den Verlauf der Ereignisse haben, die in den hoch gelegenen Gebieten starten. Sofern diese die Gerinne erreichen und in diesen weiter in tiefere Bereiche fließen kann durch die veränderte Materialverfügbarkeit im Gerinne und den modifizierten Abfluss das Ereignis beeinflusst werden. Dies kann aber mit dieser Arbeit nicht untersucht werden. Hierbei ist nur festzustellen, dass die identifizierten Startgebiete davon unabhängig sind.

Die dritte Forschungsfrage ist damit, für den untersuchten Zeitraum mit Nein zu beantworten. Es konnte kein Zusammenhang zwischen den Variationen der Muraktivität und der Landnutzung festgestellt werden. Zwar muss die Einschränkung gesetzt werden, dass nur die hochgelegenen Quellgebiete der Muren untersucht werden konnte, aber für diese spielt die Nutzung, sofern in diesen Bereichen noch davon gesprochen werden, kann keine Rolle.

8.6. Niederschlag

Die Verknüpfung mit den Niederschlagsdaten ergibt auch keinen direkten und unmittelbaren Zusammenhang. Zwar stimmt die hohe Anzahl der Murereignisse 2004 mit dem stärksten verzeichneten Tagesniederschlagsereignis 2003 von über 80 mm/d überein, die anderen Zeitscheiben bestätigen dieses Bild aber nur begrenzt. Die Aktivität 1982 und 2000 kann auf je ein Ereignis mit über 70 mm/d zurückgeführt werden. 1995 fehlt aber ein solches bei gleicher Anzahl an Ereignissen. Auch 1974 fehlt ein starkes Niederschlagsereignis, wobei hier die hohe Anzahl durch die qualitativen Bildunterschiede zwischen 1956 und 1974 begründet sein kann. Auch beim 2-Tagesniederschlag stellt sich kein einheitliches Bild dar. Entsprechend sind die Korrelationen nicht aussagekräftig.

Zu bedenken ist aber, dass die Auslösung oft durch sehr kurze Ereignisse erfolgt, die sich in den Tagesdaten nicht widerspiegeln müssen. BLIJENBERG (1998, 165 & 184) geht für das Barchelard-Tal, unmittelbar südlich des Untersuchungsgebietes von 2-15 minütigen Perioden

aus, die entscheidend für die Auslösung sind. Die Intensitäten liegen dabei im Bereich von 22 mm/h. Solche Ereignisse konnten aufgrund mangelnder Daten nicht herangezogen werden.

Ein weiterer wichtiger Punkt in Bezug auf die Aussagekraft der Ergebnisse ist die Lage der Niederschlagsmessstelle. Diese befindet sich deutlich entfernt von den höher gelegenen Gebieten in denen mit Muranrissen zu rechnen ist (siehe Abbildung 6 und 12). Zusätzlich unterscheiden sich die Niederschläge abgesehen von der Entfernung auch mit der Höhenlage, der relativen Lage zur Hauptströmungsrichtung der Luftmassen und den Bergkämmen (vgl. FLAGEOLLET et al. 1999, 67 und REMAITRE 2006, 86; siehe Abbildung 7). Bei REMAITRE (2006, 97-98) findet sich ein Vergleich der Messwerte verschiedener Niederschlagsstationen zu ausgewählten Zeitpunkten mit Murereignissen. Auch anhand dieser ist zu sehen, dass die Niederschlagswerte innerhalb des Gebietes stark schwanken.

Ein weiterer Punkt der hier zu beachten ist sind die Lücken in den Niederschlagsdaten. Diese umfassen, wie in Kapitel 3.5 dargestellt, Monate in den drei Zeitscheiben 1974, 1982 und 1995. In der ersten Periode sind nur kurze Zeiträume in den berücksichtigten Monaten (Mai bis November) betroffen. In der zweiten Zeitscheibe (1982) fehlt fast ein ganzes Jahr (September 81 bis Juni 82), während 5 Monate für die jene von 1995 fehlen. Zwar könnten in diesen Bereichen Niederschlagsereignisse von Bedeutung stattgefunden haben, aber es handelt sich um maximal 10% der Daten. Für die Zeitscheiben 1974 liegt dieser Wert nur bei 2,5%. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass alle 2,7 Jahre ein Ereignis mit über 50 mm/d in den Betrachtungszeitraum fällt.

Unter diesen Gesichtspunkten kann die Forschungsfrage vier zwar nicht bestätigt werden, es kann aber auch ein Zusammenhang der Variabilität mit dem Niederschlag nicht widerlegt werden. Vor allem da auch die fehlenden Daten mit in Betracht gezogen werden müssen. Die hohe Anzahl an Ereignissen und der starke Niederschlag der Zeitscheibe von 2004 sprechen für einen Zusammenhang und man muss wohl auch die Schwankungen der Disposition berücksichtigen. Auch die zeitliche Folge der Niederschlagsereignisse in Bezug auf vorangegangene Auslöser ist wohl aufgrund einer etwaig beschränkten Materialverfügbarkeit von Bedeutung.

Von Interesse bei dieser Fragestellung ist aber auch noch ein Zusammenhang zwischen dem Niederschlag und den Murparametern. Ein solcher konnte in der Analyse festgestellt werden. Die Korrelation beruht dabei immer auf den Durchschnittswerten der Periode, da den einzelnen Ereignissen kein individueller Niederschlag zugewiesen werden kann. Sämtliche

Korrelationen waren dabei im Vergleich mit dem maximalen 2-Tagesniederschlag stärker als mit dem maximalen Eintagesniederschlag. Dieses Verhalten war auch bereits bei der Korrelation mit der Ereigniszahl zu beobachten.

Dabei ergab sich eine negative, aber sehr starke und signifikante (Pearson) Korrelation mit den Parametern der Murlänge und der Ablagerungsfläche. Nach Spearman ergab sich eine signifikante Korrelation mit dem Einzugsgebiet, das bei der anderen Methode knapp darüber lag. Dies würde bedeuten, dass sowohl die Fläche, als auch die Länge mit zunehmendem Niederschlag abnimmt. Eine Erklärung für diesen Umstand wäre, dass es zur Auslösung vieler kleinerer Ereignisse kommt, die einen sehr hohen Schwellenwert haben. Diese Ereignisse würden dann den Mittelwert negativ beeinflussen. Bei der Neigung hingegen, die ebenfalls stark und signifikant korreliert, findet sich ein positiver Zusammenhang. Mit zunehmendem Niederschlag steigt also die mittlere Neigung. Offensichtlich handelt es sich dabei nicht um flachere Bereiche auf den Schuttfächern die durch eine erhöhte Wasserzufuhr aktiviert werden, sondern um sehr steile Bereiche unter den Felswänden oder in den Rinnen dieser Wände. Diese sind offensichtlich prinzipiell stabil, werden aber von den hohen Wassermassen aktiviert und sind entweder sensibler als die flacheren Bereiche oder treten häufiger auf, wodurch sie die Mittelwerte modifizieren.

Diese Zusammenhänge und deren Interpretation ist aber nicht sehr tragfähig. Mehrere Punkte sind hier kritisch anzumerken. Der erste ist, dass der 2-Tagesniederschlag im Regelfall nicht für die Auslösung von Murereignissen verantwortlich ist. Es handelt sich zumeist um stark durchlässiges, kaum wasserspeicherndes Material. Vorangegangene Niederschläge haben kaum einen Einfluss. Eine Ausnahme bilden Bereiche in denen es durch geologische Schichtgrenzen zu Quellaustritten kommt. Ein weiterer Punkt ist die geringe Fallzahl ($n=5$). Dadurch ist eine zufallsbedingtes Zustandekommen dieser Ergebnisse als sehr hoch einzuschätzen. Auch müssten die Gebiete, die in solchen Fällen aktiviert werden, getrennt identifiziert werden. Dazu wäre eine höhere zeitliche Auflösung erforderlich.

Entsprechend ist wohl eher von einer Scheinkorrelation auszugehen und die Wertepaare weisen zufallsbedingt die selbe Richtung auf. Eine Prüfung mit besser aufgelösten Niederschlagsdaten und einem größeren Datensatz wäre aber von Interesse.

9 Ausblick

Um die Muraktivität in einem Gebiet abschätzen zu können, ist eines von entscheidender Bedeutung: die Erfassung der aufgetretenen Ereignisse. Dabei ist sowohl das Ereignis mit entsprechenden Parametern, als auch der Zeitpunkt und der Auslösemechanismus von Bedeutung. Für weitere Untersuchungen wäre daher zum einen eine zeitlich höhere Auflösung der Luftbilder oder Analysen im Gelände erforderlich. Zum anderen wären aber auch entsprechende Klimadaten aus den entsprechenden Bereichen der Einzugsgebiete wichtig. Auch die Qualität der Daten spielt hierbei eine Rolle.

Ein entscheidender Punkt ist die Koppelung der hier vorgefundenen Ereignisse mit den Gerinnen und deren Aktivität. Die hier vorgefundenen Ereignisse stoppten im Regelfall vor dem Erreichen der Bäche, stoppten sehr schnell innerhalb dieser oder konnten nicht verfolgt werden. Außerdem entzogen sich zahlreiche kleinere Rinnen in den obersten Bereichen der Einzugsgebiete einer Analyse. In ihnen war keine Veränderung festzustellen, was aber nicht als Inaktivität interpretiert werden sollte. Es wäre also von Bedeutung die Ereignisse innerhalb der Bäche und auf den Murfächern im Tal zu erfassen. Diese sollten auf ihre Herkunft hin untersucht werden um die Kopplung zwischen der Landnutzung, Niederschlagsereignissen und der Aktivität in den unbedeckten Felsgebieten, also den potentiellen Startgebieten hin zu untersuchen. Bei solchen Versuchen sind aber die intensiven Arbeiten in einzelnen Einzugsgebieten zur Errichtung von Geschiebesperren und Sohlbefestigungen zu berücksichtigen, da sie das Verhalten und die Muraktivität deutlich verändern können.

Ob die in dieser Untersuchung erfassten Bereiche, die im Wesentlichen von menschlichen Aktivitäten unbeeinflusst blieben, entscheidend für das Gefahrenpotential in besiedelten Talbereichen ist, müsste mit einem Ansatz im Sinne eines Sediment Budgets untersucht werden. Hierbei könnte die Verknüpfung dieser Bereiche mit dem fluvialen System geklärt werden. Auch im Hinblick auf ältere, aber deutlich erkennbare Strukturen, die sich im Gegensatz zu den beobachteten Ereignissen weit in bewachsenes Gebiet hinein erstrecken, wären Erhebungen von Interesse. In welcher Periode, wie oft und unter welchen Bedingungen sich solche Ereignisse zugetragen haben, wäre wichtig für die Abschätzung zukünftiger Aktivität bei veränderten Klimabedingungen. Wobei hier auch zu berücksichtigen ist, ob es sich um materiallimitierte Systeme oder transportlimitierte Systeme handelt (BOVIS und JAKOB 1999). Es ist davon auszugehen, dass transportlimitierte Systeme stärker und

unmittelbar auf Änderungen reagieren, während bei materiallimitierenden Systemen die Reaktion nur indirekt über die Schuttproduktion erfolgt.

Ein weiterer wichtiger Punkt für weitere Untersuchungen ist ein Zusammenhang zwischen der Muraktivität und der Landnutzung, der in dieser Arbeit nicht festgestellt werden konnte. Hierbei stellt sich die Frage wo, und unter welchen Bedingungen Anrisse im Gerinne auftreten. Mit diesem Wissen könnte, mit Hilfe einer Abflussmodellierung für verschiedene Zeitpunkte versucht werden, das Verhalten zu erklären. Mit in Betracht zu ziehen wäre dabei die Frage nach der Materialverfügbarkeit und ihrer Veränderung mit der Landnutzung.

10 Literaturverzeichnis

- AULITZKY, H. (1973): Hochwasser, Muren, Lawinen. Schriftenreihe Wasserwirtschaft, Heft 2. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Wien.
- BALLANDRAS, S. (1997): Contribution a l'etude des bassins-versants torrentiels Alpins. Stratigraphies, morphodynamique, paleoenvironnements, de bassins-versants depuis 15 000 BP., These de Geographie, Universite de Savoie - C.I.S.M., Chambéry.
- BLIJENBERG, H. (1998): Rolling Stones ? Triggering and frequency of hillslope debris flows in the Bachelard Valley, southern French Alps, Doktorat an der Universität von Utrecht.
- BLIJENBERG, H.M., GRAAF, P.J.D., HENDRIKS, M.R., RUITER, J.F.D. und TETERING, A.A.A.V. (1996): Investigation of infiltration characteristics and debris flow initiation conditions in debris flow source areas using a rainfall simulator. Hydrological Processes, 10: 1527-1543.
- BOLLSCHWEILER, M., STOFFEL, M., EHMISCH, M. und MONBARON, M. (2007): Reconstructing spatio-temporal patterns of debris-flow activity using dendrogeomorphological methods. Geomorphology, 87: 337-351.
- BOLLSCHWEILER, M., STOFFEL, M. und SCHNEUWLY, D. (2005): Veränderungen der Murrinnen im Täschgufer seit 1936. Wasser Energie Luft, 97. Jahrgang(7/8): 218-223.
- BORDONNE, M. (2008): Cartographie de laves torrentielles dans le bassin de Barcelonnette. Rapport de stage de Master 1 Thesis.
- BOVIS, M.J. und JAKOB, M. (1999): The Role of Debris Supply Conditions in Predicting Debris Flow Activity. Earth Surface Processes and Landforms, 24: 1039-1054.
- BROSIUS, F. (2006): SPSS 14. mitp Redline, Heidelberg.
- CAINE, N. (1980): The Rainfall Intensity: Duration Control of Shallow Landslides and Debris Flows. Geografiska Annaler. Series A, Physical Geography, Vol. 62(1/2): 23-27.
- CALLIGARIS, C., BONIELLO, M.A. und ZINI, L. (2008): Debris flow modelling in Julian Alps using FLO-2D. In: D.D. WRACHIEN, C.A. BREBBIA und M.A. LENZI (Hrsg.), Monitoring, Simulation, Prevention and Remediation of Dense and Debris Flows II. WIT Press, Southampton, UK, S. 81-88.
- CORNFORTH, D.H. (2005): Landslides in Practice. Investigation, Analysis, and Remedial/Preventative Options in Soils. John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey.
- COROMINAS, J., REMONDO, J., FARIAS, P., ESTEVAO, M., ZEZEZE, J., TERAN, J.D.d., DIKAU, R., SCHROTT, L. und MOYA, J. (1996): Debris flow. In: R. DIKAU, D. BRUNSDEN, L. SCHROTT und M.L. IBSEN (Hrsg.), Landslide Recognition. Identification, Movement and Causes. John Wiley & Sons, Chichester, West Sussex, England, S. 161-180.

- COSTA, J.E. (1984): Physical geomorphology of debris flows. In: J.E. COSTA und P.J. FLEISHER (Hrsg.), *Developments and applications of geomorphology*. Springer-Verlag, Berlin.
- CRUDEN, D.M. und VARNES, D.J. (1996): Landslide Types and Processes. In: A.K. Turner und R.L. Schuster (Hrsg.), *Landslides - Investigation and Mitigation*. Transportation Research Board Special Report 247. National Academy of Sciences, S. 36-75.
- DAPPLES, F., OSWALD, D. und RAETZO, H. (2002): Holocene landslide activity in the Western Swiss Alps - a consequence of vegetation changes and climate oscillations. In: J. Rybar, J. Stemberk und P. Wagner (Hrsg.), *Landslides. Proceedings of the first European Conference on Landslides*. Prague, Czech Republic, A.A. Balkema Publishers, S. 349-354.
- DEHN, M. (1999): Szenarien der klimatischen Auslösung alpiner Hangrutschungen. Simulation durch Downscaling allgemeiner Zirkulationsmodelle der Atmosphäre. *Bonner Geographische Abhandlungen*, 99.
- DIKAU, R., BRUNSDEN, D., SCHROTT, L. und IBSEN, M.L. (1996): Introduction. In: R. DIKAU, D. BRUNSDEN, L. SCHROTT und M.L. IBSEN (Hrsg.), *Landslide Recognition. Identification, Movement and Causes*. John Wiley & Sons, Chichester, West Sussex, England, S. 1-12.
- DIKAU, R. und SCHROTT, L. (1999): The temporal stability and activity of landslides in Europe with respect to climatic change (TESLEC): main objectives and results. *Geomorphology*, 30(1-2): 1-12.
- EPOCH (1993): *The Temporal Occurrence and Forecasting of Landslides in the European Community*. Contract No. 90 0025 (European Community Programme).
- EVIN, M. (1997): *Geologie de l'Ubaye*, Editions Sabenca de la Valeia, Barcelonnette.
- FLAGEOLLET, J.C., MAQUAIRE, O., MARTIN, B. und WEBER, D. (1999): Landslides and climatic conditions in the Barcelonnette and Vars basins (Southern French Alps, France). *Geomorphology*, 30: 65-78.
- FLEZ, C. und LAHOUSSE, P. (2003): Contribution to assessment of the role of anthropic factors and bio-climatic controls in contemporary torrential activity in the southern Alps (Ubaye valley, France). In: E. FOUACHE (Hrsg.), *The Mediterranean World. Environment and History*. Elsevier, S. 109-121.
- FLEZ, C. und LAHOUSSE, P. (2004): Example of Holocene alpine torrent response to environmental change: contribution to assessment of forcing factors. *Quaternaire*, 15(1-2): 167-176.
- GARFI, G., BRUNO, D.E., CALCATERRA, D. und PARISE, M. (2007): Fan morphodynamics and slope instability in the Mucone River basin (Sila Massif, southern Italy): Significance of weathering and role of land use changes. *Catena*, 69: 181-196.

- GENTILE, F., BISANTINO, T. und LIUZZI, G.T. (2008): Debris-flow risk analysis in south Gargano watersheds (Southern Italy). *Natural Hazards*, 44: 1-17.
- GLADE, T. (2000): Modelling landslide-triggering rainfalls in different regions of New Zealand - the soil water status model. *Zeitschrift für Geomorphologie, Suppl.* 122 - Holocene Geomorphology: 63-84.
- GLADE, T., CROZIER, M. und SMITH, P. (2000): Applying probability determination to refine landslide-triggering rainfall thresholds using an empirical "Antecedent Daily Rainfall Model". *Pure and Applied Geophysics*, 157(6-8): 1059-1079.
- GLADE, T. und DIKAU, R. (2001): Gravitative Massenbewegungen - vom Naturereignis zur Naturkatastrophe. *Petermanns Geographische Mitteilungen*, 145(6): 42-55.
- HORTON, P., JABOYEDOFF, M. und BARDOU, E. (2008): Debris flow susceptibility mapping at a regional scale, 4th Canadian Conference on Geohazards, University Laval, Quebec, Canada.
- HUFSCHMIDT, G. und CROZIER, M.J. (2008): Evolution of natural risk: analysing changing landslide hazard in Wellington, Aotearoa/New Zealand. *Natural Hazards*, 45(2): 255-276.
- IVERSON, R.M. (1997): The physics of Debris Flows. *Reviews of Geophysics*, 35(3): 245-296.
- JAKOB, M., ANDERSON, D., FULLER, T., HUNGR, O. und AYOTTE, D. (2000): An unusually large debris flow at Hummingbird Creek, Mara Lake, British Columbia. *Canadian Geotechnical Journal*, 37(5): 1109-1125.
- JOMELLI, V., BRUNSTEIN, D., CHOCHILLON, C. und PECH, P. (2003): Hillslope debris-flow frequency since the beginning of the 20th century in the Massif des Ecrins (French Alps). In: D. Rickenmann und C. Chen (Hrsg.), *Proceedings of the third International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment*. Davos, Switzerland, Millpress. Volume 1, S. 127-137.
- KOVAR, P., SAFA, J. und SIMOVA, P. (2004): Impact of land use on rainfall-runoff regimes in mountainous catchments, Czech Republik. Case Study: The Rusava catchment. In: INTERPRAEVENT (Hrsg.), *Veränderungen im Natur- und Kulturhaushalt und ihre Auswirkungen*. Band 1, S. II/57-II/68.
- LORENZINI, G. und MAZZA, N. (2004): Debris Flow. Phenomenology and Rheological Modelling. WIT Press, Southampton, UK.
- LUZIAN, R. (2002): Wildbäche und Muren. Eine Wildbachkunde mit einer Übersicht von Schutzmassnahmen der Ära Aulitzky. Bundesamt und Forschungszentrum für Wald, Wien.
- MARKART, G., KOHL, B., PRAMSTRALLER, A. und W.GALLMETZER (2000): Wirkung von Begrünungen auf das Abflussverhalten in Wildbacheinzugsgebieten bei Starkregen. In: INTERPRAEVENT (Hrsg.), *Veränderungen im Natur- und Kulturhaushalt und ihre Auswirkungen*. Band 2, S. 53-64.

- MEETEI, L.I., PATTANAYAK, S.K., BHASKAR, A., PANDIT, M.K. und TANDON, S.K. (2007): Climatic imprints in Quaternary valley fill deposits of the middle Teesta valley, Sikkim Himalaya. *Quaternary International*, 159: 32-46.
- MÜLLER, G. und MÜNCH, A. (2002): Landnutzungsänderungen und Wasserbilanzmodellierungen des Wasserhaushaltes mit dem Modell AKWA-M. In: D. GUTKNECHT (Hrsg.), Niederschlag-Abfluss Modellierung. Simulation und Prognose. Wiener Mitteilungen. Wasser-Abwasser-Gewässer. Band 164, Wien, S. 7-17.
- PICARELLI, L., OBONI, F., EVANS, S.G., MOSTYN, G. und FELL, R. (2005): Hazard characterization and quantification. In: O. HUNGR, R. FELL, R. COUTURE und E. EBERHARDT (Hrsg.), *Landslide Risk Management*. Taylor & Francis Group, London.
- PIEGAY, H. und SALVADOR, P.G. (1997): Contemporary floodplain forest evolution along the middle Ubaye River, Southern Alps, France. *Global Ecology and Biogeography Letters*, 6: 397-406.
- REMAITRE, A. (2006): Morphologie et dynamique des laves torrentielles: Applications aux torrents des Terres Noires du bassin de Barcelonnette (Alpes du Sud), Doctorat de l'Université de Caen.
- REMAITRE, A., MALET, J.P. und MAQUAIRE, O. (2005): Morphology and sedimentology of a complex debris flow in a clay-shale basin. *Earth Surface Processes and Landforms*, 30: 339-348.
- RICKENMANN, D. (1999): Empirical Relationships for Debris Flows. *Natural Hazards*, 19: 47-77.
- RICKENMANN, D. und ZIMMERMANN, M. (1993): The 1987 debris flows in Switzerland: documentation and analysis. *Geomorphology*, 8(2-3): 175-189.
- RIEGER, D. (1999): Bewertung der naturräumlichen Rahmenbedingungen für die Entstehung von Hangmuren. Möglichkeiten zur Modellierung des Murpotentials. *Münchner Geographische Abhandlungen. Reihe A, Band A 51*, München.
- SIDLE, R.C. und OCHIAI, H. (2006): *Landslides. Processes, Prediction, and Land Use. Water Resources Monograph*. American Geophysical Union, Washington, DC.
- STINY, J. (1910): *Die Muren. Versuch einer Monographie mit besonderer Berücksichtigung der Verhältnisse in den Tiroler Alpen*. Verlag der Wagner'schen Universitätsbuchhandlung, Innsbruck.
- TAKAHASHI, T. (2007): *Debris Flow. Mechanics, Prediction and Countermeasures*. Taylor & Francis Group, London.
- THIERY, M.Y. (2007): Susceptibilité du Bassin de Barcelonnette (Alpes du Sud, France) aux 'mouvements de versant': cartographie morphodynamique, analyse spatiale et modélisation probabiliste., Doctorat de l'Université de Caen.

- THIERY, Y., MALET, J.P. und MAQUAIRE, O. (2006): Test of Fuzzy Logic Rules for landslide susceptibility assessment. In: C. WEBER und P. GANCARSKI (Hrsg.), SAGEO 2006, Proceedings International Conference on Spatial Analysis and Geomatics, Strasbourg, France, CD-Rom Support Proceedings: 18.
- VALTYNI, J. und HRONCEK, J. (2000): Aufforstung des Quellgebietes von Ipel und sein Einfluss auf den Abfluss. In: I.S.I. 2000 (Hrsg.), Veränderungen im Natur- und Kulturhaushalt und ihre Auswirkungen. Schutz des Lebensraumes vor Hochwasser, Muren und Lawinen, S. 99-108.
- VanASCH, T.W.J., BUMA, J. und VanBeek, L.P.H. (1999): A view on some hydrological triggering systems in landslides. *Geomorphology*, 30(1-2): 25-32.
- VanASCH, W.J. und VanSTEIJN, H. (1991): Temporal patterns of mass movements in the French Alps. *Catena*, 18(5): 515-527.
- VARNES, D.J. (1978): Slope movement types and processes. In: R.L. Schuster und R.J. KRIZEK (Hrsg.), Landslides - Analysis and Control. Transportation Research Board Special Report, 176. National Academy of Sciences, S. 11-33.
- WEI, F., HU, K., ZHANG, J., JIANG, Y. und CHEN, j. (2008): Determination of effective antecedent rainfall for debris flow forecast based on soil moisture content observation in Jiangjia Gully, China. In: D.D. WRACHIEN, C.A. BREBBIA und M.A. LENZI (Hrsg.), Monitoring, Simulation, Prevention and Remediation of Dense and Debris Flows II. WIT Press, Southampton, UK, S. 13-22.
- WICHMANN, V. (2006): Modellierung geomorphologischer Prozesse in einem alpinen Einzugsgebiet. Abgrenzung und Klassifizierung der Wirkungsräume von Sturzprozessen und Muren mit einem GIS. Eichstätter Geographische Arbeiten, Band 15. Profil Verlag, München.
- WRACHIEN, D.D. und MAMBRETTI, S. (2008): Dam-break shock waves: a two-phase model for mature and immature debris flow. In: D.D. WRACHIEN, C.A. BREBBIA und M.A. LENZI (Hrsg.), Monitoring, Simulation, Prevention and Remediation of Dense and Debris Flows II. WIT Press, Southampton, UK, S. 183-196.
- YU, F.-C., CHEN, C.-Y., CHEN, T.-C., HUNG, F.-Y. und LIN, S.-C. (2006): A GIS Process for Delimitating Areas Potentially Endangered by Debris Flow. *Natural Hazards*, 37: 169-189.
- ZIMMERMANN, M. und HAEBERLI, W. (1992): Climatic change and debris flow activity in high-mountain areas. A case study in the Swiss Alps. *Catena*, Suppl. 22: 59-72.
- ZIMMERMANN, M., MANI, P., GAMMA, P., GSTEIGER, P., HEINIGER, O. und HUNZIKER, G. (1997): Murgefahren und Klimaänderung - ein GIS-basierter Ansatz. Schlussbericht NFP 31, Zürich.

Internetquellen:

BARCELONNETTE 2009: Homepage der Gemeinde Barcelonnette
http://www.barcelonnette.com/fr/il4-3_p50-barcelonnette-et-le-mexique.aspx
Stand: 24.11.2009

GOOGLE MAPS 2009:
<http://maps.google.at/maps?hl=de&tab=vl>
Stand: 24.11.2009

OMIV 2009a: Observatoire Multidisciplinaire des Instabilités de Versants'
http://eost.u-strasbg.fr/omiv/images/CrossSection_BdB.jpg
Stand 24.11.2009

OMIV 2009b: Observatoire Multidisciplinaire des Instabilités de Versants'
http://eost.u-strasbg.fr/omiv/images/Figure_02_Torrential_Activi.jpg
Stand 24.11.2009

OMIV 2009c: Observatoire Multidisciplinaire des Instabilités de Versants'
http://eost.u-strasbg.fr/omiv/images/Figure_09_RTM_03.jpg
Stand 24.11.2009

Sonstige Quellen:

ERDAS FIELD GUIDE, 2005

11 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Fronte eines Murschubes, Jiang Jia Ravine, Yunnan, China, 24.6.1990 (Foto von K.M. Scott in IVERSON 1997, 256)	13
Abbildung 2:	Dispositionsmodell (ZIMMERMANN et al. 1997, 32, verändert)	15
Abbildung 3:	Beispiel der Kartierung der Orthofotos (links: 2000; mitte: 2004; rechts: 2004, kartiert)	29
Abbildung 4:	Verifizierte Bereiche des Untersuchungsgebietes	30
Abbildung 5:	Lage des Untersuchungsgebietes (Quelle: GOOGLE MAPS, 2009)	41
Abbildung 6:	Überblick über das Untersuchungsgebiet und die Einzugsgebiete.....	42
Abbildung 7:	Niederschlagsvariabilität im Untersuchungsgebiet (REMAITRE 2006, 83, verändert)	44
Abbildung 8:	Tektonische Übersicht des Gebietes (REMAITRE 2006, 69 nach EVIN 1997).....	45
Abbildung 9:	Geologischer Schnitt (OMIV 2009a)	46
Abbildung 10:	Kumulierte Murereignisse und in der Region Barcelonnette 1850-2004 (OMIV 2009b).....	48
Abbildung 11:	Check dams im Riou-Bourdoux um 1905 (OMIV 2009c).....	49
Abbildung 12:	Übersicht der Lage der Murereignisse	51
Abbildung 13:	Verteilung der Einzugsgebietsflächen und der Murereignisse in Bezug auf die Höhenlage	53
Abbildung 14:	Verteilung der Murereignisse in Bezug auf die Höhenlage, getrennt nach der Talseite	54
Abbildung 15:	Verteilung der Murlängen und Ablagerungsflächengröße	54
Abbildung 16:	Verteilung der Einzugsgebietsflächen und der Murereignisse in Bezug auf die Hangneigung.....	55
Abbildung 17:	Verteilung der Einzugsgebietsgrößen der Murereignisse.....	56
Abbildung 18:	Murlänge und Ablagerungsflächengröße in den einzelnen Zeitscheiben	64
Abbildung 19:	Landnutzung im Untersuchungsgebiet 1974, 1982 und 2000, gesamt und getrennt nach Talseite	69
Abbildung 20:	Landnutzung im Untersuchungsgebiet 1974, 1982 und 2000, getrennt nach Talseite für die Bereiche über 1.900 m Seehöhe	70
Abbildung 21:	Flächen mit veränderter Landnutzung zwischen 1974 und 2000 im Vergleich zu den Startpunkten der Muren.....	71
Abbildung 22:	Landnutzungsänderung in einem Ausschnitt der nordexponierten Talseite zwischen 1974 und 2000 im Vergleich zu den Startpunkten der Muren	72
Abbildung 23:	Maximaler Tagesniederschlag 1956-2004 für die Station Barcelonnette – Pont Long	75
Abbildung 24:	Maximaler 2-Tagesniederschlag 1956-2004 für die Station Barcelonnette – Pont Long	76

12 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Klassifikation gravitativer Massenbewegungen (CRUDEN und VARNES 1996, 38).....	9
Tabelle 2:	Parameter der orthorektifizierten Luftbilder von 1956 und 1995.....	23
Tabelle 3:	Fehlende Niederschlagsdaten der Station Barcelonnette – Pont Long zwischen 1956 und 2004 (orange: komplett fehlend, gelb: teilweise fehlend)	26
Tabelle 4:	Bezeichnung, Zeitraum und Dauer der verwendeten Zeitscheiben.....	28
Tabelle 5:	Bezeichnungen für die Stärke der Korrelation (BROSIUS 2006, 519).....	35
Tabelle 6:	Flusseinzugsgebiete des Untersuchungsraumes.....	43
Tabelle 7:	Verteilung der Murereignisse und Ablagerungsgebiete in unterschiedlichen Flusseinzugsgebieten	51
Tabelle 8:	Korrelationsmatrix der einzelnen Murparameter für das gesamte Untersuchungsgebiet	57
Tabelle 9:	Übersicht der Murparameter, gegliedert nach Talseite, Anzahl der Muren/Ablagerungsgebiete im jeweiligen Gebiet in Klammer angeführt	58
Tabelle 10:	Übersicht der Murparameter, gegliedert nach Geologie, Anzahl der Muren/Ablagerungsgebiete im jeweiligen Gebiet in Klammer angeführt	58
Tabelle 11:	Überprüfung der statistischen Signifikanz der Unterschiede in den Murparametern, gegliedert nach der Geologie, für alle 3 Gruppen.....	59
Tabelle 12:	Überprüfung der statistischen Signifikanz der Unterschiede in den Murparametern, gegliedert nach der Geologie, nur für die Gruppen Kalk und Flysch	59
Tabelle 13:	Korrelationsmatrix der einzelnen Murparameter für die Gruppe Kalk	60
Tabelle 14:	Korrelationsmatrix der einzelnen Murparameter für die Gruppe Flysch.....	61
Tabelle 15:	Häufigkeit und Rate der Murereignisse in den unterschiedlichen Zeitscheiben	62
Tabelle 16:	Häufigkeit und Rate der Murereignisse in den unterschiedlichen Zeitscheiben, gegliedert nach Talseite und Geologie.....	63
Tabelle 17:	Übersicht der Murparameter der einzelnen Zeitscheiben, gegliedert nach Talseite, Anzahl der Muren/Ablagerungsgebiete im jeweiligen Gebiet in Klammer angeführt	65
Tabelle 18:	Übersicht der Murparameter der einzelnen Zeitscheiben, gegliedert nach Geologie, Anzahl der Muren/Ablagerungsgebiete im jeweiligen Gebiet in Klammer angeführt	66
Tabelle 19:	Überprüfung der statistischen Signifikanz der Unterschiede zwischen den einzelnen Zeitscheiben, Gruppe Kalk.....	67
Tabelle 20:	Überprüfung der statistischen Signifikanz der Unterschiede zwischen den einzelnen Zeitscheiben, Gruppe Flysch	67
Tabelle 21:	Überprüfung der statistischen Signifikanz der Unterschiede zwischen den geologischen Gruppen Flysch und Kalk für die Zeitscheibe 1995	68
Tabelle 22:	Überprüfung der statistischen Signifikanz der Unterschiede zwischen den beiden Talseiten für die Zeitscheibe 2004	68
Tabelle 23:	Verteilung der Murereignisse unter Berücksichtigung der Landnutzung und Talseite.	73
Tabelle 24:	Korrelationsmatrix zum Zusammenhang zwischen Niederschlag und Ereignisse	77
Tabelle 25:	Korrelationsmatrizen zum Zusammenhang Niederschlag und Murparameter.....	78

Anhang

LEBENS LAUF

Persönliche Daten:

Name	Rainer Stummer
Adresse	1230 Wien, Ellminger gasse 10/6/9
Geburtstag	14. November 1980
Geburtsort	Wien
Staatsbürgerschaft	Österreich
Familienstand	ledig

Bildungsgang:

<u>1987 – 1991</u>	Volkschule, Wien
<u>1991 – 1995</u>	Realgymnasium, Wien
<u>1995 – 2000</u>	HTBL u VA Mödling (Bautechnik Tiefbau)
<u>2001</u>	Präsenzdienst
<u>Oktober 2001</u>	Studium an der technische Universität Wien (Bauingenieurwesen)
<u>seit Oktober 2004</u>	Studium an der Universität Wien, Institut für Geographie und Regionalforschung (Studienzweig Theoretische und angewandte Geographie)

Bisherige Erfahrungen:

<u>August 1996 u. 1997</u>	Ferialpraktikant b. Ilbau Gesellschaft.m.b.H
<u>August 1998</u>	Ferialpraktikant b. Switelsky Bauges.m.b.H
<u>August 1999</u>	Ferialpraktikant b. Wertheim Ges.m.b.H.
<u>August – Dezember 2000</u>	Techn. Angestellter bei: Ziviltechnikerbüro Dipl. Ing. Reiss & Dipl. Ing. Kirkovits
<u>Dezember 2001</u>	Techn. Angestellter bei: Ziviltechniker GmbH Klestil
<u>Jänner 2002 – September 2004</u>	Techn. Angestellter bei: IC Consulanten Ziviltechniker GesmbH
<u>seit Oktober 2004</u>	Techn. Angestellter bei: IC Consulanten Ziviltechniker GesmbH (Teilzeit)
<u>Sommersemester 2007 und 2008</u>	Tutor für die Lehrveranstaltung „Übungen zur Bodengeographie und Ökologie“
<u>Wintersemester 2007</u>	Tutor für die Lehrveranstaltung „Labormethoden in der Physiogeographie“
<u>Sommersemester 2009</u>	Tutor für die Lehrveranstaltung „Angewandte Physische Geographie am Beispiel des Globalen Wandels in Gebirgsräumen“

Fähigkeiten und Kenntnisse:

Sprachen	Deutsch (Muttersprache) Englisch (Wort und Schrift)
-----------------	--

EDV-Kenntnisse	Microsoft Office ArcGIS Erdas Imagine SPSS Modflow AutoCAD ABK
-----------------------	--